

UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS - UNISINOS
UNIDADE ACADÊMICA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA
NÍVEL MESTRADO PROFISSIONAL

Ágner Grion

**PROPOSTA DE UM ENCAPSULAMENTO DEDICADO
PARA SENSOR MAGNÉTICO**

São Leopoldo, RS

2016

Ágner Grion

PROPOSTA DE UM ENCAPSULAMENTO DEDICADO PARA SENSOR MAGNÉTICO

Dissertação apresentada à Universidade do Vale do Rio dos Sinos – Unisinos, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Luis Rhod

São Leopoldo, RS

2016

G868p

Grion, Ágner

Proposta de um encapsulamento dedicado para sensor magnético / por Ágner Grion. -- São Leopoldo, 2016.

141 f. : il. color. ; 30 cm.

Dissertação (mestrado) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, São Leopoldo, RS, 2016.

Orientação: Prof. Dr. Eduardo Luis Rhod, Escola Politécnica.

1.Eletricidade. 2.Magnetismo. 3.Eletromagnetismo.
4.Acondicionamento eletrônico. 5.Embalagem microeletrônica.
6.Engenharia elétrica. I.Rhod, Eduardo Luis. II.Título.

CDU 537

621.318

621.798

Catálogo na publicação:
Bibliotecária Carla Maria Goulart de Moraes – CRB 10/1252

Ágner Grion

PROPOSTA DE UM ENCAPSULAMENTO DEDICADO PARA SENSOR MAGNÉTICO

Dissertação apresentada à Universidade do Vale do Rio dos Sinos – Unisinos, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.

Aprovado em 17 de junho de 2016.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Rafael Haag
Universidade Estadual do Rio Grande do Sul

Prof. Dr. Giovani Bulla
Universidade do Vale do Rio dos Sinos

Prof. Dr. Eduardo Luis Rhod (Orientador)

Prof. Dr. Eduardo Luis Rhod
Coordenador PPG em Engenharia Elétrica

À minha filha, Malu.

Agradecimentos

Agradeço a todos os professores do mestrado pela dedicação e talento na transmissão dos conhecimentos, em especial ao Prof. Dr. Eduardo Luis Rhod pela orientação e pela confiança depositada em mim durante a realização deste trabalho e ao Prof. Celso Peter pelo apoio e sugestão do tema.

Ao pessoal do Modelab, em especial ao Filipe Nicoli pelo suporte com os desenhos.

Aos colegas do mestrado, cuja convivência contribuiu para enriquecer este trabalho.

Aos colegas da Cientec pelo incentivo.

A minha família, especialmente a minha esposa, pela paciência, incentivo e companheirismo em todos os momentos.

A todos os demais que de alguma forma contribuíram para realização deste trabalho, muito obrigado!

*“It is not knowledge, but the act of learning,
not possession but the act of getting there,
which grants the greatest enjoyment.”
(Carl Friedrich Gauss)*

Resumo

Atualmente os sensores magnéticos estão presentes em uma grande variedade de equipamentos, tais como computadores, automóveis, aviões, instrumentos médicos e industriais. Em muitas destas aplicações os sensores magnéticos oferecem meios seguros e não invasivos de detecção e são mais confiáveis do que outras tecnologias. A corrente elétrica em um condutor gera um campo magnético que pode ser detectado por este tipo de sensor. Este trabalho tem como objetivo definir um encapsulamento dedicado a um sensor de corrente elétrica que utiliza uma MTJ (Junção Túnel Magnética) como dispositivo de detecção. No desenvolvimento foram analisadas diferentes propostas de encapsulamentos através do software de modelagem COMSOL[®]. Os resultados obtidos com a análise térmica, magnética e a avaliação dos custos relativos de produção entre estas propostas levaram a definição de um encapsulamento para a aplicação pretendida.

Palavras-chaves: Encapsulamento. Sensores de corrente elétrica. Sensores Magnéticos. MTJ.

Abstract

Nowadays there are magnetic sensors in a wide variety of equipment such as computers, cars, airplanes, medical and industrial instruments. In many of these applications the magnetic sensors offer safe and non-invasive means of detection and are more reliable than others technologies. The electric current in a conductor generates a magnetic field detected by this type of sensor. This work aims to define a package dedicated to an electrical current sensor using a MTJ (Magnetic Tunnel Junction) as a sensing device. Different proposals of packaging were analyzed by COMSOL[®] modeling software. The results obtained from the thermal and magnetic analysis and the relative costs of production between these proposals led to the definition of a package to the intended application.

Key-words: Packaging. Electrical Current Sensors. Magnetic Sensors. MTJ.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Linhas de campo evidenciadas com limalhas de ferro em torno de um ímã (à esquerda) e representação teórica das linhas de campo (à direita)	33
Figura 2 – Representação gráfica da expressão da lei de Biot-Savart	36
Figura 3 – Tipos de sensores magnéticos e faixas de medição típicas	38
Figura 4 – Evolução ao longo dos últimos anos do efeito TMR em MTJs	40
Figura 5 – Estrutura básica de uma MTJ: (a) resistência alta e (b) baixa	40
Figura 6 – O efeito de TMR, eletrodos em paralelo em (a) e anti-paralelo em (b)	41
Figura 7 – Representação de uma típica estrutura MTJ implementada	42
Figura 8 – Imagem de uma MTJ, camadas principais em (a) e estrutura completa em (b)	43
Figura 9 – Diagrama esquemático do sensor adotado	43
Figura 10 – Encapsulamento típico de um chip	44
Figura 11 – Primeiros dispositivos de lógica integrada	45
Figura 12 – A evolução dos encapsulamentos	46
Figura 13 – Classificação dos encapsulamentos	47
Figura 14 – Sensor magnético AMR com DIP cerâmico para altas temperaturas	48
Figura 15 – Sensor magnético GMR em encapsulamento SOIC	48
Figura 16 – Micro sensor magnético Hall em encapsulamento QFN	49
Figura 17 – Magnetômetro de 3 eixos com encapsulamento do tipo BGA	50
Figura 18 – Sensor Hall com encapsulamento do tipo WLCSP	50
Figura 19 – Diagrama simplificado do processo de encapsulamento DIP	51
Figura 20 – Representação das estruturas dos encapsulamentos DIP e BGA	52
Figura 21 – Solda do chip, método convencional (a) e <i>flip chip</i> (b)	53
Figura 22 – Solda de fios em um chip	53
Figura 23 – Sensor de Lopes et al. (2013) (a) e representação gráfica (b)	59
Figura 24 – Detalhe do encapsulamento DIP implementado em Cubells et al. (2013)	60
Figura 25 – Protótipo de sensor de corrente produzido por Reig et al. (2004)	61
Figura 26 – Simulação do campo magnético realizada em Beltran et al. (2007)	62
Figura 27 – Fluxograma com plano de execução do trabalho proposto	63
Figura 28 – Modelo de encapsulamento simplificado	64
Figura 29 – Modelo utilizado na verificação de simulação térmica	70
Figura 30 – Curvas de capacidade de corrente para o modelo simulado	71
Figura 31 – Modelo com o fio retilíneo	72
Figura 32 – Modelo utilizado para a segunda simulação	73
Figura 33 – Simulação realizada para a verificação da modelagem campo magnético	74
Figura 34 – Pontos de medição para as simulações com o encapsulamento simplificado	77

Figura 35 – Exemplo com a simulação magnética para o estudo de caso 1	78
Figura 36 – B(mT) para diferentes larguras de trilha	79
Figura 37 – Exemplo com a simulação térmica para o estudo de caso 2	80
Figura 38 – Exemplo com a simulação magnética para o estudo de caso 3	81
Figura 39 – Exemplo com a simulação magnética para o estudo de caso 4	83
Figura 40 – Exemplo com a simulação térmica para o estudo de caso 4	84
Figura 41 – Exemplo com a simulação magnética para o estudo de caso 5	85
Figura 42 – Chip com sensor MTJ utilizado	89
Figura 43 – Vista isométrica com o encapsulamento projetado para a proposta 1 . .	90
Figura 44 – Vista isométrica com a parte do encapsulamento simulada na proposta 1	90
Figura 45 – Proposta 1, vista das trilhas superior (a) e inferior (b)	91
Figura 46 – Simulação do campo para trilha inferior, proposta 1	92
Figura 47 – Vista isométrica com a parte do encapsulamento simulada na proposta 2	94
Figura 48 – Detalhe do campo magnético sobre o fio de ouro	95
Figura 49 – Corrente vs. temperatura no fio de ouro	96
Figura 50 – Comparação da trilha superior entre as propostas.	97
Figura 51 – Corrente vs. campo na trilha superior.	98
Figura 52 – Simulação térmica da proposta 2, calor gerado na trilha inferior.	99
Figura 53 – Vista isométrica com a parte do encapsulamento simulada na proposta 3.	100
Figura 54 – Simulação magnética da trilha superior para a proposta 3	100
Figura 55 – Vista isométrica com o encapsulamento projetado para a proposta 4 . .	102
Figura 56 – Vista isométrica com a parte do encapsulamento simulada na proposta 4	103
Figura 57 – Vista superior da trilha no <i>leadframe</i> sendo (a) inicial e (b) alterado . .	105
Figura 58 – Simulação magnética da trilha no <i>leadframe</i>	106
Figura 59 – Comparação do campo resultante entre as propostas	108
Figura 60 – Comparação da temperatura resultante entre as propostas	109
Figura 61 – Comparativo de uso entre os processos <i>wire bonding</i> e <i>flip chip</i>	111
Figura 62 – Materiais e suas principais características	141

Lista de tabelas

Tabela 1 – Permeabilidades relativas para alguns materiais	35
Tabela 2 – Comparação entre os sensores magnéticos de filmes finos	39
Tabela 3 – Características do sensor adotado	44
Tabela 4 – Propriedades dos materiais utilizados	69
Tabela 5 – Modelagem térmica, comparativo de resultados	71
Tabela 6 – Modelagem magnética, comparativo de resultados primeira simulação .	73
Tabela 7 – Modelagem magnética, comparativo de resultados segunda simulação .	74
Tabela 8 – Resumo das definições iniciais	75
Tabela 9 – Parâmetros combinados utilizados nos estudos de caso 1 e 2	76
Tabela 10 – Parâmetros combinados utilizados no estudo de caso 3	82
Tabela 11 – Parâmetros combinados utilizados no estudo de caso 4	83
Tabela 12 – Parâmetros combinados utilizados no estudo de caso 5	84
Tabela 13 – Valores mínimos obtidos nas simulações em cada estudo de caso	87
Tabela 14 – Valores máximos obtidos nas simulações em cada estudo de caso	87
Tabela 15 – Correntes simuladas na proposta 1	91
Tabela 16 – Resultados das simulações para a trilha de corrente inferior da proposta 1	92
Tabela 17 – Resultados das simulações para a trilha de corrente superior da proposta 1	93
Tabela 18 – Correntes simuladas na proposta 2	94
Tabela 19 – Resultados das simulações para o fio de ouro da proposta 2	95
Tabela 20 – Resultados das simulações para a trilha de cobre superior da proposta 2	96
Tabela 21 – Resultados das simulações para a trilha superior após revisão do projeto	97
Tabela 22 – Resultados das simulações para a trilha de corrente inferior da proposta 2	98
Tabela 23 – Resultados das simulações para a trilha de cobre superior da proposta 3	101
Tabela 24 – Resultados das simulações para a trilha de cobre inferior da proposta 3	101
Tabela 25 – Correntes simuladas na proposta 4	103
Tabela 26 – Resultados das simulações para o fio de ouro na proposta 4	104
Tabela 27 – Resultados das simulações com a trilha na proposta 4	104
Tabela 28 – Resultados das simulações após a modificação da trilha na proposta 4 .	105
Tabela 29 – Valores de corrente atendidos por proposta	107
Tabela 30 – Tabela comparativa entre as propostas	112
Tabela 31 – Resultados para o estudo de caso 1 com espessura de trilha de 0,035mm (1Oz)	125
Tabela 32 – Resultados para o estudo de caso 1 com espessura de trilha de 0,070mm (2Oz)	126
Tabela 33 – Resultados para o estudo de caso 1 com espessura de trilha de 0,105mm (3Oz)	127

Tabela 34 – Resultados para o estudo de caso 2 com espessura de trilha de 0,035mm (1Oz)	129
Tabela 35 – Resultados para o estudo de caso 2 com espessura de trilha de 0,070mm (2Oz)	130
Tabela 36 – Resultados para o estudo de caso 2 com espessura de trilha de 0,105mm (3Oz)	131
Tabela 37 – Resultados para o estudo de caso 3	133
Tabela 38 – Resultados para o estudo de caso 4	135
Tabela 39 – Resultados para o estudo de caso 5	137

Lista de abreviaturas e siglas

AC	<i>Alternating Current</i>
AMR	<i>Anisotropic Magnetoresistance</i>
BG	<i>Back Grinding</i>
BGA	<i>Ball Grid Array</i>
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
CI	Circuito Integrado
COB	<i>Chip On Board</i>
CTE	<i>Coefficient of Thermal Expansion</i>
DOS	<i>Density of States</i>
DC	<i>Direct Current</i>
DIP	<i>Dual In-line Package</i>
EMC	<i>Epoxy Moulding Compound</i>
GMI	<i>Giant Magnetoimpedance</i>
GMR	<i>Giant Magnetoresistance</i>
I/O	<i>Input / Output</i>
IPC	<i>Institute of Printed Circuits</i>
ITRS	<i>International Technology Roadmap for Semiconductors</i>
MCM	<i>Multichip Module</i>
MEF	Método dos Elementos Finitos
MR	<i>Magnetoresistance</i>
MTJ	<i>Magnetic Tunnel Junction</i>
MRAM	<i>Magnetic Random Access Memory</i>
PCI	Placa de Circuito Impresso

POP	<i>Package-on-Package</i>
PTH	<i>Pin Through Hole</i>
PVC	<i>Policloreto de Vinil</i>
QFN	<i>Quad Flat No Leads</i>
QFP	<i>Quad Flat Pack</i>
SDT	<i>Spin-Dependent Tunneling</i>
SOIC	<i>Small Outline Integrated Circuit</i>
SOP	<i>Small Outline Package</i>
SMT	<i>Surface Mount Technology</i>
SQUID	<i>Superconducting Quantum Interference Device</i>
TAB	<i>Tape Automated Bonding</i>
TMR	<i>Tunneling Magnetoresistance</i>
TSOP	<i>Thin Small Outline Package</i>
UBM	<i>Under-Bump-Metallization</i>
WLCSP	<i>Wafer Level Chip Scale Package</i>

Lista de símbolos

A	Área
q	Carga Elétrica
h	Coefficiente de Convecção Térmica
l	Comprimento
σ	Condutividade Elétrica
k	Condutividade Térmica
I	Corrente Elétrica
ϵ_y	Deformação Plástica
J	Densidade de Corrente
B	Densidade de Fluxo Magnético
D	Densidade de Fluxo Elétrico
R	Distância
F	Força de Lorentz
ϕ	Fluxo Magnético
\dot{Q}	Fluxo de Calor
E	Intensidade de Campo Elétrico
H	Intensidade de Campo Magnético
M	Magnetização
E_y	Módulo de Young
K	Kelvin
μ	Permeabilidade Magnética
ϵ	Permissividade Elétrica
ρ	Resistividade Elétrica

χ	Susceptibilidade magnética
T	Temperatura
T _g	Temperatura de Transição Vítreá
σ_y	Tensão Mecânica
V _P	Tensão elétrica de pico
c	Velocidade da Luz
v	Velocidade

Sumário

1	INTRODUÇÃO	27
1.1	Definição do Tema	27
1.2	Delimitações do Trabalho	28
1.3	Objetivos	28
1.3.1	Objetivo Geral	28
1.3.2	Objetivos Específicos	28
1.4	Justificativa	28
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	31
2.1	Eletromagnetismo - Conceitos Básicos	31
2.2	Campo Magnético	32
2.2.1	Campo Magnético Produzido por Correntes	35
2.3	Sensor Magnético - Considerações Iniciais	37
2.3.1	Breve Histórico do Efeito de TMR	39
2.3.2	Princípio de Funcionamento da MTJ e o Efeito de TMR	40
2.3.3	Estrutura de uma Célula de MTJ	42
2.3.4	Características Funcionais do Sensor Escolhido	43
2.4	Encapsulamento - Considerações Iniciais	44
2.4.1	Breve Histórico do Encapsulamento de Circuitos Integrados	45
2.4.2	Classificação dos Encapsulamentos	47
2.4.3	Tipos de Encapsulamento	48
2.4.3.1	DIP (<i>Dual In-line Package</i>)	48
2.4.3.2	SOP (<i>Small Outline Package</i>)	48
2.4.3.3	QFP (<i>Quad Flat Pack</i>)	49
2.4.3.4	BGA (<i>Ball Grid Array</i>)	49
2.4.3.5	WLCSP (<i>Wafer Level Chip Scale Package</i>)	50
2.4.3.6	COB (<i>Chip on Board</i>)	50
2.4.4	Processos de Fabricação	51
2.4.4.1	Polimento	51
2.4.4.2	Serra	52
2.4.4.3	Solda do Chip	52
2.4.4.4	Solda de Fios	53
2.4.4.5	Moldagem	53
2.4.4.6	Corte e Conformação	54
2.4.4.7	Aplicação de Esferas e Corte do Substrato	54

2.4.4.8	Marcação	54
2.4.5	Materiais e Propriedades	54
2.4.5.1	Condutividade Elétrica	55
2.4.5.2	Permissividade Elétrica	56
2.4.5.3	Condutividade Térmica	56
2.4.5.4	Convecção Térmica	57
2.4.5.5	Coefficiente de Expansão Térmica	57
2.4.5.6	Temperatura de Transição Vítreia	58
2.4.5.7	Módulo de Young	58
2.5	Trabalhos Correlatos	58
3	METODOLOGIA	63
4	DESENVOLVIMENTO E RESULTADOS	67
4.1	Definições Iniciais	67
4.1.1	Ferramentas Utilizadas e Fluxo de Trabalho	67
4.1.2	Materiais Utilizados e Propriedades	67
4.1.3	Verificação Inicial dos Modelos	69
4.1.3.1	Verificação da Modelagem Térmica	69
4.1.3.2	Verificação da Modelagem Magnética	72
4.1.4	Resumo da Primeira Etapa e Considerações Finais	75
4.2	Modelagem de um Encapsulamento Simplificado	75
4.2.1	Encapsulamento Simplificado - Estudo de Caso 1	77
4.2.2	Encapsulamento Simplificado - Estudo de Caso 2	80
4.2.3	Encapsulamento Simplificado - Estudo de Caso 3	81
4.2.4	Encapsulamento Simplificado - Estudo de Caso 4	82
4.2.5	Encapsulamento Simplificado - Estudo de Caso 5	84
4.2.6	Resumo da Segunda Etapa e Considerações Finais	85
4.3	Modelagem de Diferentes Propostas de Encapsulamento	88
4.3.1	Proposta de Encapsulamento 1	89
4.3.2	Proposta de Encapsulamento 2	93
4.3.3	Proposta de Encapsulamento 3	99
4.3.4	Proposta de Encapsulamento 4	102
4.3.5	Resumo da Terceira Etapa e Considerações Finais	106
4.4	Breve Análise dos Custos Envolvidos	109
4.5	Comparação de Resultados e Definição de uma das Propostas	112
5	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	115

REFERÊNCIAS	117
APÊNDICES	123
APÊNDICE A – ESTUDO DE CASO 1	125
APÊNDICE B – ESTUDO DE CASO 2	129
APÊNDICE C – ESTUDO DE CASO 3	133
APÊNDICE D – ESTUDO DE CASO 4	135
APÊNDICE E – ESTUDO DE CASO 5	137
ANEXOS	139
ANEXO A – MATERIAIS E SUAS CARACTERÍSTICAS	141

1 Introdução

Os sensores magnéticos estão presentes em uma ampla variedade de equipamentos, como computadores, automóveis, aviões, instrumentos médicos e industriais. Lenz e Edelstein (2006) citam que ao longo das últimas décadas os sensores magnéticos tem auxiliado no controle e análise de diversas aplicações, sendo que, de acordo com Mahdi, Panina e Mapps (2003), em muitas destas aplicações os sensores magnéticos oferecem meios de sensoriamento seguros, não invasivos e não destrutivos e representam uma tecnologia mais robusta e confiável do que outras existentes.

Devido às necessidades impostas pelo surgimento de novas aplicações, os métodos empregados na detecção de campos magnéticos por estes sensores precisam ser constantemente revistos e muitas vezes substituídos por tecnologias emergentes (REIG; CUBELLS-BELTRÁN; RAMÍREZ, 2009).

Assim, durante as últimas décadas, o estudo dos efeitos físicos relacionados à manipulação dos spins dos elétrons conduziu a importantes descobertas científicas e tecnológicas e ao surgimento da spintrônica, a qual possibilitou o desenvolvimento de novos sensores magnéticos destinados a uma ampla variedade de aplicações. Segundo Arikan et al. (2013) a junção túnel magnética (MTJ) é um dos elementos de maior sucesso decorrentes da spintrônica, sendo utilizada para diversas aplicações, como por exemplo: cabeçotes de leitura de discos rígidos, memórias magnéticas de acesso aleatório (MRAMs), equipamentos de microscopia magnética e sensores magnéticos diversos.

Os sensores magnéticos precisam ser encapsulados e, para ter o seu funcionamento garantido, o encapsulamento deve ser adequadamente dimensionado. A proposta deste trabalho diz respeito ao encapsulamento de uma célula MTJ como elemento sensor para a medição de correntes elétricas. Embora já existam algumas versões comerciais disponíveis para esta aplicação, os sensores baseados em MTJs ainda representam uma ferramenta promissora no gerenciamento de energia em áreas onde a medição de corrente é crítica, como por exemplo em medidores de energia, transformadores de corrente industriais, wattímetros inteligentes e veículos elétricos, conforme citam Sánchez et al. (2012).

1.1 Definição do Tema

O principal interesse neste trabalho está em analisar as interações entre o campo magnético gerado por trilhas condutoras, encapsulamento e uma MTJ em diferentes configurações, com a finalidade de propor uma solução otimizada que considera os aspectos funcionais e também os custos de fabricação de um encapsulamento para este tipo de

tecnologia.

1.2 Delimitações do Trabalho

Este trabalho limita-se a análise térmica e magnética de um encapsulamento para um sensor magnético com base nos modelos de encapsulamentos e técnicas de fabricação existentes, utilizando para isso ferramentas de simulação e modelagem em software. O intuito é permitir uma posterior implementação prática. Não faz parte do escopo deste trabalho o desenvolvimento da MTJ ou de novos materiais e processos produtivos tanto do sensor quanto do encapsulamento.

1.3 Objetivos

Os objetivos dividem-se em: geral e específicos.

1.3.1 Objetivo Geral

Definir um encapsulamento dedicado para um sensor integrado utilizando uma MTJ como dispositivo de sensoramento.

1.3.2 Objetivos Específicos

São objetivos específicos deste trabalho:

- a) analisar e comparar, através de ferramentas de simulação, a resposta térmica e magnética de pelo menos três propostas de encapsulamentos diferentes, com o propósito de verificar qual se adapta melhor para o sensor em questão, considerando aspectos como faixa de operação, sensibilidade magnética e desempenho térmico;
- b) determinar os principais custos relativos envolvidos nas diferentes propostas de encapsulamento, considerando os processos de fabricação existentes na indústria.

1.4 Justificativa

Reig e Cubells-Beltrán (2013) citam que mesmo se tratando de um conceito muito bem estabelecido, a medição da corrente elétrica ainda é um motivo de preocupação, principalmente por conta das limitações impostas pelos tradicionais métodos de medição de corrente. As resistências *shunt*, por exemplo, em geral apresentam baixo custo e são fáceis de utilizar, porém apresentam perdas por inserção, limitações térmicas e não oferecem isolamento galvânica, enquanto que os transformadores de corrente, por outro lado,

apresentam boa isolamento, porém possuem severas restrições de frequência e geralmente têm grandes dimensões.

Flores (2010) cita que atualmente, o controle e a precisão sobre circuitos eletrônicos são muito importantes, especialmente no que se refere aos dispositivos microeletrônicos, onde as medições de corrente elétrica, potência e energia têm sido um motivo de preocupação. Deste modo, novos dispositivos, precisos, integráveis, com baixo consumo de energia e baixo custo são necessários.

Os sensores de estado sólido são uma alternativa para superar a maior parte das desvantagens apresentadas pelos métodos tradicionais, sendo capazes de medir correntes elétricas indiretamente através de campos magnéticos. Podem ser aplicados para a medição de correntes sobre fios, trilhas de placas de circuito impresso ou mesmo em circuitos integrados, além de serem geralmente pequenos e baratos e capazes de lidar com correntes contínuas e alternadas (REIG; CUBELLS-BELTRÁN, 2013). Uma das recentes tecnologias de estado sólido são as MTJs. Lopes et al. (2013) citam que atualmente as MTJs representam uma escolha confiável para este tipo de aplicação, devido a alta sensibilidade magnética que pode ser alcançada com este tipo de tecnologia. Para Sánchez et al. (2012) o uso de MTJs como sensores para o monitoramento de correntes, ainda não está consolidado, sendo esta considerada uma aplicação promissora, uma vez que tecnologias mais antigas continuam desempenhando esse papel.

O foco deste trabalho está na análise do encapsulamento do elemento sensor, preenchendo uma lacuna em relação ao tema, uma vez que a literatura apresenta diversos trabalhos que relacionam o uso de MTJs e de outras tecnologias à atividade de monitoramento de correntes elétricas, no entanto, carecem estudos cujo foco seja o encapsulamento deste tipo de dispositivo.

Segundo Tummala (2001) o encapsulamento de um chip deve permitir que este desempenhe todas as funções para o qual ele foi projetado, além disso, ele deve fornecer o suporte físico, proteger, dissipar o calor e possibilitar a integração deste chip com o restante do sistema. Reig, Cubells-Beltrán e Ramírez (2009) citam que o projeto deste tipo de sensores é bastante delicado, sendo que o encapsulamento pode estar na origem de uma série de efeitos indesejáveis, como por exemplo: baixa isolamento, devido a uma seleção incorreta de dielétrico; limitações térmicas originadas por efeito Joule e acoplamentos mútuos, resultantes de trilhas de corrente próximas. Além disso, o encapsulamento é um dos fatores limitantes para o custo de sistemas eletrônicos (ITRS, 2011); assim a definição de um encapsulamento deve levar em consideração também o custo entre as diferentes arquiteturas e processos disponíveis. Portanto, o desenvolvimento de um encapsulamento adequado, economicamente viável, que permita aproveitar a alta sensibilidade oferecida por este tipo de tecnologia e esteja em consonância com as demais características é fundamental, sendo esta a principal justificativa para a implementação deste trabalho.

2 Revisão Bibliográfica

Neste capítulo será apresentada a fundamentação teórica relacionada aos conceitos necessários para a execução deste trabalho. Inicialmente são vistos alguns conceitos básicos do eletromagnetismo, especialmente relacionados ao campo magnético. Em seguida, são descritos os principais aspectos ligados ao elemento sensitivo utilizado neste trabalho. Após, são apresentados os tipos de encapsulamento existentes, assim como os principais aspectos a eles relacionados. Para finalizar, são apresentados alguns trabalhos correlatos ao tema.

2.1 Eletromagnetismo - Conceitos Básicos

O eletromagnetismo pode ser compreendido como um conjunto de fenômenos que dizem respeito à interação entre campos elétricos e magnéticos e sua inter-relação. Nosso ambiente está imerso em campos eletromagnéticos, parte deles gerados naturalmente, como por exemplo, através de radiação solar e descargas atmosféricas e parte gerada por nós mesmos, como por exemplo, através de estações de rádio, telefones celulares e linhas de transmissão (WENTWORTH, 2009).

A descobertas de Hans Christian Oersted de que a corrente elétrica cria um campo magnético e de Michael Faraday de que a variação do campo magnético com o tempo cria um campo elétrico, culminaram na unificação, através de James Clerk Maxwell, da eletricidade e do magnetismo, através de quatro equações conhecidas como equações de Maxwell (WENTWORTH, 2009). As equações de Maxwell, relacionam os vetores de campo elétrico e magnético, \mathbf{E} e \mathbf{B} , a suas fontes, que podem ser cargas elétricas, correntes ou campos variáveis. A partir destas equações é possível demonstrar todas as leis fundamentais da eletricidade e do magnetismo: leis de Coulomb, Gauss, Biot-Savart, Ampère e Faraday. (TIPLER; MOSCA, 2004). As equações em sua forma pontual são apresentadas a seguir:

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho_v \quad (2.1)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (2.2)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (2.3)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J}_c + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (2.4)$$

onde, \mathbf{D} corresponde a densidade de fluxo elétrico, \mathbf{B} a densidade de fluxo magnético, \mathbf{E} a intensidade de campo elétrico, \mathbf{H} a intensidade de campo magnético, ρ_v a um elemento de volume e \mathbf{J}_c a densidade de corrente de condução.

A equação (2.1) é a lei de Gauss, ela afirma que o fluxo do campo elétrico através de qualquer superfície fechada é igual à carga total confinada por aquela superfície.

A equação (2.2) é a lei de Gauss para o magnetismo, ela afirma que o fluxo do campo magnético através de qualquer superfície fechada é nulo.

A equação (2.3) é a lei de Faraday, ela afirma que o campo elétrico ao longo de qualquer curva fechada é igual ao negativo da taxa de variação do fluxo magnético através de qualquer superfície limitada pela curva.

A equação (2.4) é a lei de Ampère-Maxwell, ela afirma que o campo magnético ao longo de qualquer curva fechada é igual a soma da corrente que atravessa qualquer superfície limitada pela curva mais o produto da taxa de variação do fluxo do campo magnético através da superfície.

Conforme citam Halliday, Resnick e Walker (2010) as quatro equações de Maxwell são fundamentais para compreender o eletromagnetismo, pois uma grande variedade de fenômenos podem ser explicados através delas, desde o motivo pelo qual uma bússola aponta para o norte até a razão de um carro partir quando giramos a ignição.

2.2 Campo Magnético

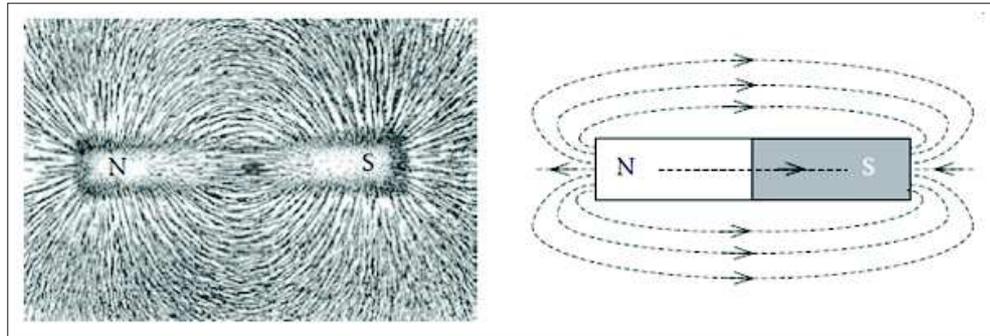
Um campo magnético pode ser entendido como uma variação de energia em um volume do espaço, cujo gradiente desta energia produz uma força, que pode ser percebida pela aceleração de uma carga elétrica movendo-se através deste campo, por um condutor de corrente elétrica, pelo torque em um dipolo magnético, ou mesmo por uma reorientação de spins em elétrons de certos tipos de átomos (JILES, 1991). A Figura 1 mostra o campo magnético criado por um ímã, evidenciado através de limalhas de ferro e também representado graficamente.

O magnetismo e os campos magnéticos são um dos mais antigos fenômenos físicos investigados e mensurados, segundo Tipler e Mosca (2004), há mais de 2.000 anos os gregos já conheciam uma pedra que atraía pedaços de ferro, o que hoje chamamos de magnetita, evidências indicam o uso de ímãs na navegação desde século XII.

De acordo com Tumanski (2011), a intensidade do campo magnético \mathbf{H} e a densidade de fluxo magnético \mathbf{B} são os dois parâmetros mais importantes relacionados ao campo magnético. Outros parâmetros, como, permeabilidade, perdas magnéticas, polarização, magnetização e curva de magnetização dependem destes dois parâmetros.

Tumanski (2011) cita que o físico Hendrik Antoon Lorentz demonstrou em 1892,

Figura 1 – Linhas de campo evidenciadas com limalhas de ferro em torno de um ímã (à esquerda) e representação teórica das linhas de campo (à direita)



Fonte: Tumanski (2011).

que um campo eletromagnético atua com uma força \mathbf{F} sobre uma carga q movendo-se a velocidade \mathbf{v} , de acordo com a seguinte expressão:

$$\mathbf{F} = q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mu_0 \mathbf{H}) \quad (2.5)$$

Esta força pode ser dividida em duas partes. A primeira causada por um campo elétrico \mathbf{E} :

$$\mathbf{F}' = q\mathbf{E} \quad (2.6)$$

A segunda causada por um campo magnético \mathbf{H} :

$$\mathbf{F}'' = q\mathbf{v} \times \mu_0 \mathbf{H} \quad (2.7)$$

onde μ_0 corresponde a permeabilidade magnética no vácuo ($4\pi \times 10^{-7}$ T·m/A).

Pode-se concluir portanto, que um campo elétrico atua sobre qualquer carga, estacionária ou em movimento, enquanto que o campo magnético, atua apenas sobre cargas em movimento. A unidade de força de um campo magnético \mathbf{H} , também chamada de intensidade do campo magnético é normalmente expressa em A/m (TUMANSKI, 2011).

A presença de um campo magnético de intensidade \mathbf{H} , sobre um plano de área \mathbf{A} , resulta em um fluxo magnético ϕ , que depende das propriedades magnéticas do meio, como a permeabilidade μ e a magnetização \mathbf{M} do material. No vácuo, não há magnetização e a permeabilidade corresponde a constante μ_0 , assim, o fluxo magnético causado por um campo de intensidade \mathbf{H} é dado pela equação (2.8).

$$\phi = \mu_0 \mathbf{H} \cdot \mathbf{A} \quad (2.8)$$

A unidade do fluxo magnético é o weber (Wb) que corresponde a 1Tm^2 (tesla-metro quadrado).

A densidade de fluxo magnético \mathbf{B} , também chamada de indução magnética é dada pela seguinte expressão:

$$\mathbf{B} = \frac{\phi}{\mathbf{A}} \quad (2.9)$$

ou, a partir das equações (2.8) e (2.9):

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H} \quad (2.10)$$

Assim, conforme demonstrado na equação 2.10, a relação entre a intensidade do campo magnético \mathbf{H} e a densidade de fluxo \mathbf{B} para o espaço livre é linear e dada pela constante de permeabilidade do vácuo μ_0 (PALLAS-ARENY; WEBSTER, 2001). A unidade da densidade de fluxo magnético é o tesla (T). Para outros materiais, a relação é dada pela seguinte equação:

$$\mathbf{B} = \mu_0(\mathbf{H} + \mathbf{M}) \quad (2.11)$$

em que \mathbf{M} corresponde ao vetor de magnetização do material. Nesta relação, $\mu_0 \mathbf{H}$, representa a contribuição de fontes externas, enquanto que $\mu_0 \mathbf{M}$ representa a contribuição interna do material magnetizado (ULABY, 2007).

Segundo Tumanski (2011), todo o material magnetizado compreende um grande número de dipolos elementares, resultantes da órbita dos elétrons ao redor do núcleo ou da própria rotação dos elétrons (*spin*), assim, mesmo que a contribuição externa seja nula, um material pode apresentar uma determinada densidade de fluxo, decorrente de magnetização espontânea ou resultante de uma magnetização anterior. Ainda, segundo o autor, a magnetização é definida como o momento magnético resultante do somatório destes dipolos por unidade de volume e é representada pela mesma unidade da intensidade de campo magnético (A/m).

Dependendo do tipo de material, ao se aplicar um campo externo sobre um material magnetizado, diferentes resultados podem ser obtidos, por exemplo: em materiais diamagnéticos, a magnetização não ocorre na mesma direção que o campo aplicado, de modo que a densidade de fluxo resultante é enfraquecida; em materiais paramagnéticos, a magnetização ocorre na mesma direção que o campo aplicado, de modo que a densidade de fluxo é reforçada; já em materiais ferromagnéticos e ferrimagnéticos, a magnetização pode ser significativamente maior e na mesma direção do campo aplicado (TUMANSKI, 2011).

No caso dos materiais diamagnéticos e paramagnéticos o vetor de magnetização \mathbf{M} é proporcional a intensidade de campo \mathbf{H} multiplicada pela constante de susceptibilidade magnética do material (χ), conforme demonstrado por Halliday, Resnick e Walker (2010) na equação (2.12):

$$\mathbf{B} = \mu_0(\mathbf{H} + \mathbf{M}) = \mu_0(\mathbf{H} + \chi \mathbf{H}) = \mu_0(1 + \chi) \mathbf{H} = \mu_0 \mu_r \mathbf{H} = \mu \mathbf{H} \quad (2.12)$$

onde μ_r corresponde a permeabilidade relativa do material, que relaciona a permeabilidade absoluta e a permeabilidade do vácuo ($\mu_r = \mu/\mu_0$). Através de μ_r pode-se avaliar o grau no qual um material pode influenciar o campo magnético, quanto maior a permeabilidade relativa do material maior é sua magnetização. No espaço livre (vácuo), $\mu_r=1$ e não há efeito sobre o campo, nos materiais diamagnéticos μ_r é ligeiramente menor que 1, enquanto que nos materiais paramagnéticos μ_r é ligeiramente maior que 1, a maior parte destes materiais é pouco afetada pelo campo magnético. Nos materiais ferromagnéticos μ_r é muito maior que 1 chegando a valores próximos a 10^6 , tais materiais são fortemente afetados pelo campo magnético (WENTWORTH, 2009). A Tabela 1 lista alguns materiais com suas permeabilidades relativas correspondentes.

Tabela 1 – Permeabilidades relativas para alguns materiais

Classe	Material	μ_r
Diamagnético	bismuto	0,99983
	ouro	0,99986
	prata	0,99998
	cobre	0,999991
	água	0,999991
Paramagnético	ar	1,0000004
	alumínio	1,00002
	platina	1,0003
Ferromagnético (não-linear)	cobalto	250
	níquel	600
	ferro (99,8% de pureza)	5000
	ferro (99,96% de pureza)	280.000
	supermalloy Mo/Ni	1.000.000

Fonte: Wentworth (2009).

2.2.1 Campo Magnético Produzido por Correntes

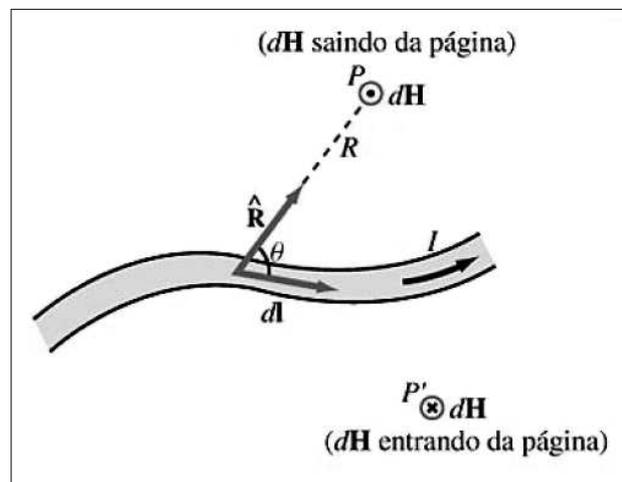
Em 1820 Hans Christian Oersted descobriu que uma bússola se deslocava perto de um fio com corrente elétrica, evidenciando que a corrente elétrica gera um campo magnético ao redor do fio condutor. Esta descoberta inspirou Andre Marie Ampère a formular a hipótese de que uma corrente elétrica é uma fonte de campo magnético e a Jean Baptiste Biot e Felix Savart enunciarem a lei de Biot-Savart (TUMANSKI, 2011). Através de experimentos quantitativos relacionando a força exercida pela corrente elétrica sobre um ímã próximo, Jean Baptiste Biot e Felix Savart chegaram a uma expressão matemática que retorna o campo magnético para um determinado ponto no espaço em função da corrente que produz este campo. Esta expressão é chamada de lei de Biot-Savart (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2010).

A lei de Biot-Savart diz que o campo magnético diferencial $d\mathbf{H}$ gerado por uma corrente elétrica I que percorre um condutor de comprimento diferencial $d\mathbf{l}$, é dado pela seguinte expressão:

$$d\mathbf{H} = \frac{I}{4\pi} \frac{d\mathbf{l} \times \hat{\mathbf{R}}}{R^2} \quad (2.13)$$

onde, $\mathbf{R} = \hat{\mathbf{R}}R$ representa o vetor da distância entre $d\mathbf{l}$ e o ponto de observação P no espaço. A Figura 2 demonstra graficamente essas variáveis; na figura, o sentido do campo no ponto P aponta para fora do plano da página e é inverso ao sentido do ponto P' que aponta para dentro do plano da página. O sentido pode ser obtido simplesmente apontando o polegar da mão direita na direção da corrente e fechando os demais dedos da mão ao redor do condutor em direção do campo.

Figura 2 – Representação gráfica da expressão da lei de Biot-Savart



Fonte: Ulaby (2007).

Ulaby (2007) destaca que pela lei de Biot-Savart, $d\mathbf{H}$ varia com R^2 , ou seja o campo magnético é inversamente proporcional ao quadrado da distância e é ortogonal ao plano que contém a direção do elemento de corrente $d\mathbf{l}$ e ao vetor de distância \mathbf{R} . Halliday, Resnick e Walker (2010) observam também que a magnitude de $d\mathbf{H}$ é proporcional as magnitudes de corrente e de $d\mathbf{l}$, e ao seno do ângulo θ entre os vetores $d\mathbf{l}$ e $\hat{\mathbf{R}}$.

Uma vez que $d\mathbf{H}$ pode ser entendido como uma representação infinitesimal do campo, Ulaby (2007) cita que para determinar o campo magnético \mathbf{H} em um condutor de comprimento finito é necessário somar as contribuições de todos os elementos de correntes do condutor, conforme a integral a seguir:

$$\mathbf{H} = \frac{I}{4\pi} \int_l \frac{d\mathbf{l} \times \hat{\mathbf{R}}}{R^2} \quad (2.14)$$

onde l representa a linha ao longo da qual a corrente I existe. Tipler e Mosca (2004) citam que a integração de todos os elementos de corrente de um circuito pode ser bastante complexa dependendo da geometria do circuito.

Conforme citam Wentworth (2009) e Halliday, Resnick e Walker (2010) nos problemas de magnetostática que apresentam alguma simetria, é possível utilizar a lei circuital de Ampère mais facilmente que a lei de Biot-Savart. A lei circuital de Ampère informa que a integração do campo magnético \mathbf{H} , ao redor de qualquer caminho fechado, é igual a corrente líquida encerrada pelo caminho. A lei é expressa na forma de equação como:

$$\oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = I_{enc} \quad (2.15)$$

onde, segundo Wentworth (2009), a mesma equação pode ser obtida a partir da lei de Biot-Savart através da aplicação do *teorema de Stokes* e do *rotacional*.

2.3 Sensor Magnético - Considerações Iniciais

Um sensor magnético pode ser definido como um elemento transdutor que converte o sinal oriundo de um campo magnético em um sinal elétrico (BALTES; POPOVIC, 1986).

Tumanski (2011) cita que a maior parte dos sensores magnéticos são na realidade sensores de fluxo de campo magnético, pois, segundo o autor, quando um sensor de campo magnético é utilizado para medir o campo no ar, na maior parte das vezes não é importante se ele está medindo a densidade de fluxo magnético \mathbf{B} , ou a intensidade do campo magnético \mathbf{H} , uma vez que ambas as variáveis estão relacionadas linearmente ($\mathbf{B} = \mu_0\mathbf{H}$).

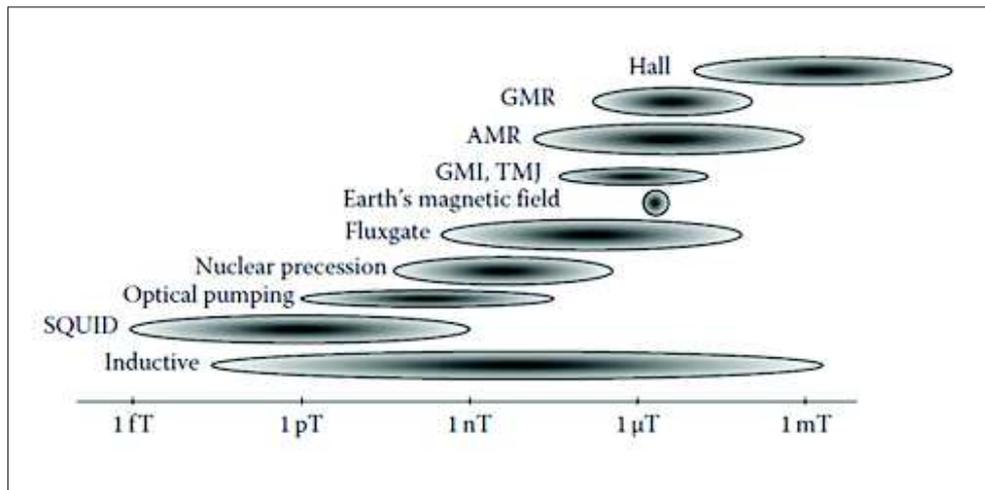
Além disso, o uso do termo “sensor magnético” não significa necessariamente que o dispositivo seja utilizado para a medição de campos magnéticos, na maior parte dos casos, o uso destes sensores esta ligado a outras atividades indiretas, como a detecção de movimentos em elementos mecânicos, manipulação de dados digitais, ou mesmo, a detecção de correntes elétricas, como no propósito deste trabalho.

Lenz e Edelstein (2006) comentam que as técnicas envolvidas no sensoriamento de campos magnéticos exploram uma ampla variedade de fenômenos e conhecimentos, relacionados à áreas como física e ciência dos materiais. No geral, a aplicação destes sensores magnéticos está condicionada a diversos parâmetros do sistema, como por exemplo, sensibilidade, linearidade, potência, tamanho, frequência e temperatura (TUMANSKI, 2013).

A Figura 3 exemplifica alguns dos principais tipos de sensores existentes em função de suas faixas de medição típicas. Na figura é possível identificar que os sensores do tipo Hall são os menos sensíveis, enquanto que os sensores do tipo SQUID (*Superconducting Quantum Interference Device*) são os mais sensíveis.

Xiao (2012) classifica os sensores magnéticos em duas grandes categorias, uma que não é baseada em filmes finos ou requer condições especiais de operação e outra baseada em filmes finos.

Figura 3 – Tipos de sensores magnéticos e faixas de medição típicas



Fonte: Tumanski (2013).

No caso da primeira categoria, por exemplo, dois importantes sensores são os *Fluxgate* e os SQUIDs. Os sensores do tipo *Fluxgate* consistem em duas bobinas enroladas em torno de um núcleo magnético, enquanto que os sensores SQUID, requerem um ambiente criogênico para funcionar. Segundo Xiao (2012) estes sensores sofrem as desvantagens de terem altos preços, grande consumo de energia e dimensões relativamente grandes, quando comparados aos sensores da segunda categoria, que podem ser fabricados em larga escala e com custos menores, utilizando processos semelhantes aos empregados na fabricação de circuitos integrados.

Os sensores de efeito Hall, magnetorresistência anisotrópica (AMR), magnetorresistência gigante (GMR) e magnetorresistência de tunelamento (TMR) são exemplos de sensores baseados em filmes finos, ou de estado sólido, que podem ser classificados na segunda categoria.

Neste trabalho será utilizado um sensor baseado no efeito de magnetorresistência de tunelamento (TMR) que ocorre em uma estrutura multicamada formada por um material isolante entre duas camadas ferromagnéticas, também conhecida como junção túnel magnética (MTJ). Por esta razão, na literatura, este tipo de sensor magnético é convenientemente chamado de sensor TMR ou MTJ, do inglês *tunneling magnetoresistance* e *magnetic tunneling junction*, respectivamente.

Este tipo de sensor ganhou notoriedade nos últimos anos em aplicações de larga escala, como nos cabeçotes magnéticos de leitura dos discos rígidos e também em tecnologias proeminentes, como nas memórias magnéticas não voláteis de acesso aleatório - MRAM (LECLAIR; MOODERA, 2012).

Atualmente sua utilização tem se expandido para outras aplicações comerciais, muitas vezes substituindo outros sensores de estado sólido, devido principalmente a

características como maior sensibilidade, menor consumo de potência e maior variação de resistência, se comparado aos sensores de efeito Hall, AMR e GMR (XIAO, 2012). A Tabela 2 apresenta um comparativo com os valores comerciais aproximados entre estas tecnologias.

Tabela 2 – Comparação entre os sensores magnéticos de filmes finos

Tecnologia	Corrente (mA)	Tamanho (mm)	Sensibilidade (mV/V/Oe)	Faixa (Oe)	Resolução ($nT/Hz^{\frac{1}{2}}$)	Temp. (°C)
Hall	5-20	1 x 1	0,05	10000	>100	<150
AMR	1-10	1 x 1	1	10	0,1-10	<150
GMR	1-10	1 x 2	3	100	1-10	<150
TMR	0,001 - 0,01	0,5 x 0,5	100	1000	0,1-10	<200

Fonte: Adaptado de Multidimension (2015).

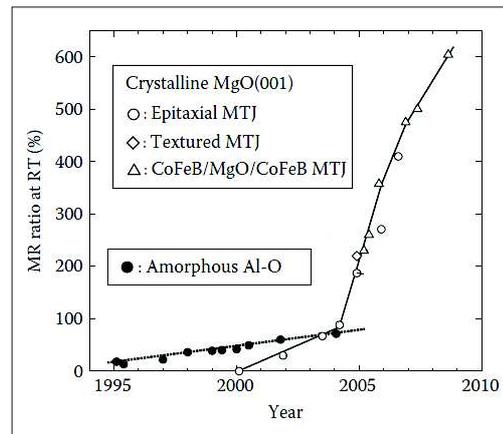
2.3.1 Breve Histórico do Efeito de TMR

Segundo Baraduc, Chshiev e Dieny (2013), o fenômeno da TMR foi observado pela primeira vez em 1971 por Tedrow e Meservey ao estudar o comportamento do *spin* do elétron.

Em 1975, o físico Michel Julliere, realizou os primeiros experimentos bem sucedidos em uma MTJ a baixas temperaturas (4.2K), ao estudar o tunelamento entre filmes ferromagnéticos separados por uma barreira semicondutora (Fe/Ge/Co). Nesse experimento, Julliere verificou que a corrente de tunelamento dependia da magnetização relativa entre as camadas ferromagnéticas e que esta podia ser modificada pela aplicação de um campo magnético. A resistência elétrica da estrutura montada por Julliere apresentava, como efeito da TMR, um aumento de até 14% em relação a resistência inicial, quando a orientação magnética entre suas camadas ferromagnéticas mudava de paralelo para antiparalelo. Contudo, os experimentos realizados por Julliere eram difíceis de reproduzir e somente duas décadas depois, pesquisadores de dois grupos distintos obtiveram valores próximos a 20% de TMR em temperatura ambiente, ao utilizar uma fina camada isolante de óxido de alumínio, alumina (Al_2O_3), entre duas camadas ferromagnéticas.

Após 1995, a pesquisa sobre TMR se tornou muito ativa, segundo Fert (2012), o passo mais importante foi a transição da MTJ com barreira amorfa de alumina para uma constituída de cristal único utilizando, por exemplo, o óxido de magnésio (MgO). Ainda, segundo o autor, o principal avanço ocorreu em 2004, quando pesquisadores da universidade de Tsukuba do Japão e da empresa IBM conseguiram obter grandes proporções de TMR, até 200% em temperatura ambiente, ao se utilizar MgO em MTJs de alta qualidade estrutural. Tais resultados estimularam o desenvolvimento sucessivo de novas pesquisas e aplicações tecnológicas, levando a valores recentes próximos a 600% de TMR em temperatura ambiente, conforme visto na Figura 4.

Figura 4 – Evolução ao longo dos últimos anos do efeito TMR em MTJs



Fonte: Yuasa (2012).

2.3.2 Princípio de Funcionamento da MTJ e o Efeito de TMR

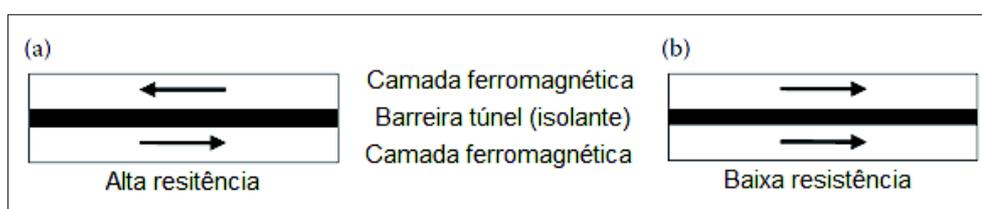
Uma MTJ consiste em uma estrutura composta por duas camadas de metal ferromagnético (eletrodos), separadas por um filme isolante ultrafino, na maior parte das vezes um óxido, que atua como uma barreira de potencial também chamada de barreira túnel (YUASA, 2012).

Ao se aplicar uma tensão de polarização nos eletrodos, os elétrons deixam um estado ocupado em uma das camadas ferromagnéticas e tunelam através da barreira de potencial ocupando um estado livre na segunda camada ferromagnética. O tunelamento de elétrons pode ser definido como um fenômeno quântico pelo qual uma corrente elétrica pode fluir através de uma fina região isolante (LECLAIR; MOODERA, 2012).

Em uma MTJ, normalmente um dos eletrodos possui uma orientação magnética fixa (camada de referência), enquanto que o outro eletrodo (camada de detecção) é livre, ou seja, sua orientação magnética pode mudar na presença de um campo magnético.

Quando as duas camadas ferromagnéticas estão orientadas em sentidos magnéticos opostos (anti-paralelo), a resistência elétrica é alta, enquanto que, quando elas estão orientadas no mesmo sentido magnético (paralelo), a resistência é baixa. A Figura 5 ilustra este processo.

Figura 5 – Estrutura básica de uma MTJ: (a) resistência alta e (b) baixa



Fonte: Adaptado de Du (2014).

A mudança de resistência em função da orientação magnética relativa entre as camadas ferromagnéticas recebe o nome de efeito TMR e é um dos principais fenômenos da spintrônica (YUASA, 2012). A quantificação deste efeito, conhecida como taxa de magnetorresistência é dada pela equação (2.16) mostrada a seguir:

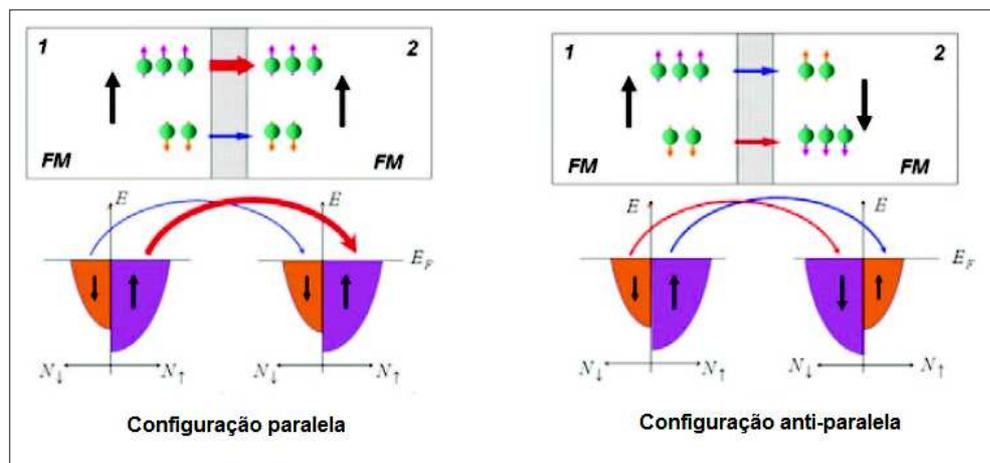
$$TMR = \frac{R_{AP} - R_P}{R_P} \times 100\% \quad (2.16)$$

onde, R_P e R_{AP} , correspondem respectivamente aos valores de resistência elétrica, para a orientação magnética paralelo (P) e anti-paralelo (AP) das camadas ferromagnéticas.

Fernandes (2011) cita que o efeito de TMR se baseia em duas condições básicas definidas pelo modelo de Julliere.

A primeira condição é que durante o processo de tunelamento, os elétrons preservam seus estados de *spin*, assim, os elétrons com uma determinada orientação de *spin* só podem tunelar para um estado livre de mesma orientação de *spin*, resultando em dois canais independentes de tunelamento. A Figura 6 ilustra o processo de tunelamento de elétrons entre os dois eletrodos de uma MTJ.

Figura 6 – O efeito de TMR, eletrodos em paralelo em (a) e anti-paralelo em (b)



Fonte: Zhu e Park (2006).

A segunda condição é que a condutância resultante é proporcional ao produto da densidade de estados (DOS) no nível de Fermi dos dois eletrodos para uma mesma orientação de *spin*.

Assim, a condutância para os alinhamentos paralelo (G_P) e anti-paralelo (G_{AP}) pode ser definida como:

$$G_P \propto D_E^M D_D^M + D_E^m D_D^m \quad (2.17)$$

$$G_{AP} \propto D_E^m D_D^M + D_E^M D_D^m \quad (2.18)$$

onde, $D_{D,E}^{M,m}$, corresponde aos estados majoritário (M) e minoritário (m) no nível de Fermi dos eletrodos ferromagnéticos da direita (D) e da esquerda (E). Uma vez que a G_P é maior que a G_{AP} , a corrente de tunelamento também é proporcionalmente maior para o alinhamento paralelo, enquanto que a resistência segue relação inversa.

Pelo modelo de Julliere (1975), a equação da taxa de magnetorresistência (2.16) pode ser reescrita em função da polarização dos *spins* (P) dos eletrodos, como:

$$TMR = \frac{2P_1P_2}{1 - P_1P_2} \quad (2.19)$$

onde, P_1 e P_2 , correspondem aos fatores de polarização de *spin* para cada um dos eletrodos ferromagnéticos. Sendo:

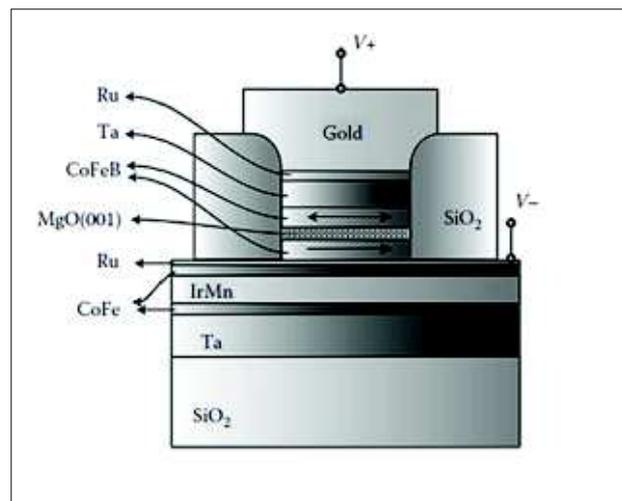
$$P_\alpha = \frac{D_{\alpha M} - D_{\alpha m}}{D_{\alpha M} + D_{\alpha m}} \quad (2.20)$$

onde, $D_{\alpha M}$, $D_{\alpha m}$ são respectivamente a DOS no nível de Fermi, no eletrodo correspondente ($\alpha = 1,2$), para os portadores majoritários e minoritários.

2.3.3 Estrutura de uma Célula de MTJ

Embora o efeito TMR ocorra através de uma MTJ simples de três camadas, em aplicações práticas normalmente outras camadas são necessárias a estrutura. A Figura 7 exibe uma estrutura típica.

Figura 7 – Representação de uma típica estrutura MTJ implementada

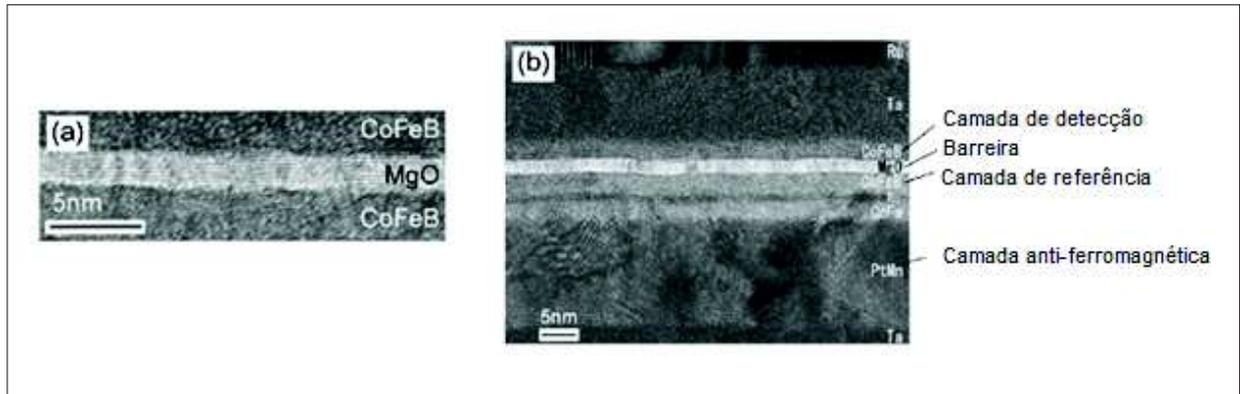


Fonte: Xiao (2012).

Na Figura 7, a camada ferromagnética de CoFeB sobre a camada da barreira de MgO, é a camada de detecção e a camada de CoFeB abaixo da camada de barreira, é a camada de referência.

A orientação magnética da camada de referência é fixada pela camada anti-ferromagnética de Ir-Mn em conjunto com as camadas de Ru e CoFe, por um fenômeno denominado “*exchange-bias*”. As camadas remanescentes visam possibilitar o acoplamento estrutural e magnético entre camadas. A Figura 8 mostra a imagem de uma MTJ obtida por um microscópio de transmissão eletrônica, onde, em (a) são vistas em detalhe as camadas de tunelamento e em (b) a estrutura completa de uma MTJ.

Figura 8 – Imagem de uma MTJ, camadas principais em (a) e estrutura completa em (b)

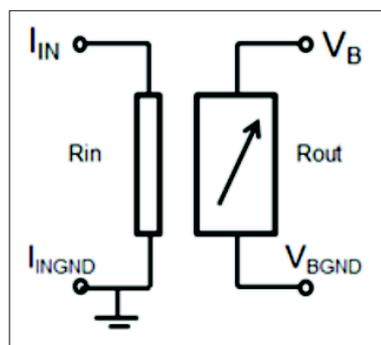


Fonte: Adaptado de Yuasa e Djayaprawira (2007).

2.3.4 Características Funcionais do Sensor Escolhido

Conforme mencionado anteriormente, neste trabalho será desenvolvido um encapsulamento para um sensor baseado no efeito TMR. O diagrama esquemático com as conexões do chip produzido pela empresa Crocus Technology, modelo CTSR200X, que foi escolhido para este trabalho, é apresentado na Figura 9 a seguir.

Figura 9 – Diagrama esquemático do sensor adotado



Fonte: Crocus (2014).

Na Figura 9, V_B e V_{BGND} representam os terminais de entrada para a tensão de polarização, enquanto que I_{IN} e I_{INGND} são terminais de entrada para uma fonte de corrente constante, cuja função é auxiliar na polarização da MTJ do sensor. O campo

magnético incidente sobre o sensor é medido através da resistência de saída (R_{out}) percebida pela corrente que passa através dos terminais V_B e V_{BGND} . As características funcionais do chip escolhido são apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 – Características do sensor adotado

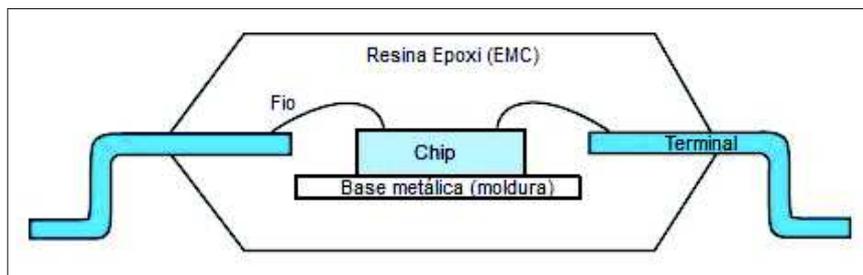
Parameter	Description	Min	Typical	Max	Unit
Voltage Supply (V_B)	No Bias		3 - 5		V
R_{out}			1 - 20		k Ω
Input Bias (I_{IN})			25		mA
R_{IN}			100		Ω
Sensitivity			10		mV/mA/Oe
Linearity Range	Sweep ± 20 Oe		± 20		Oe
Linearity Error			1.8		%FS
Hysteresis		3 Sweeps ± 20 Oe		1.0	
Max. Exposed Field			10000		Oe
Operating Frequency		DC		1000	MHz
Operating Temperature		-40		85	$^{\circ}$ C

Fonte: Adaptado de Crocus (2014).

2.4 Encapsulamento - Considerações Iniciais

Embora existam diversos níveis de encapsulamento, neste trabalho, o termo refere-se apenas ao nível de encapsulamento relacionado ao chip ou como também é chamado, *die*. A figura a seguir ilustra o encapsulamento típico de um chip.

Figura 10 – Encapsulamento típico de um chip



Fonte: Adaptado de Tummala (2001).

Segundo Tummala (2001), o encapsulamento deve assegurar que as necessidades mecânicas, térmicas, elétricas e químicas de um determinado chip sejam adequadamente atendidas. De modo geral, pode-se dizer que o encapsulamento possui seis funções principais:

1. fornecer uma estrutura física para o suporte ao chip;
2. proteger o chip de elementos externos mecânicos e ambientais;

3. fazer a conexão elétrica de sinais e energia entre o chip e o sistema;
4. dissipar o calor gerado pelo chip para o ambiente;
5. possibilitar a integração e a testabilidade dos chips;
6. permitir um processo de montagem de alto rendimento.

Atualmente existe uma grande variedade de tipos de encapsulamentos disponíveis, portanto a seleção adequada do encapsulamento é uma preocupação tanto para os fabricantes de dispositivos eletrônicos quanto para os fabricantes de semicondutores.

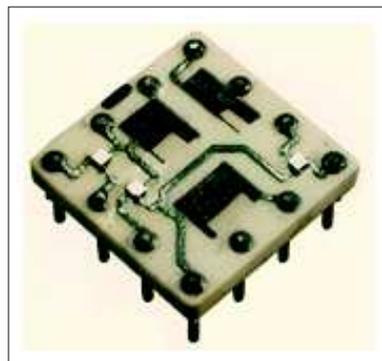
Ginsberg (1992), cita que a escolha de um encapsulamento deve levar em consideração muitos fatores, como por exemplo, o material utilizado, a capacidade de portas, o tipo de montagem, a estabilidade térmica, o desempenho elétrico e os custos da montagem.

Os catálogos comerciais mostram que atualmente os sensores magnéticos de estado sólido (Hall, GMR, AMR e TMR) estão disponíveis em diferentes tipos de encapsulamentos e variam conforme o fabricante e a aplicação.

2.4.1 Breve Histórico do Encapsulamento de Circuitos Integrados

Segundo Fjelstad e Mitchell (2004), o encapsulamento surgiu juntamente com o circuito integrado (CI) no final dos anos 50. Nos primórdios do CI, os transistores eram interligados através de circuitos impressos e agrupados em módulos para realizar as funções desejadas, esses dispositivos eram simples, mas possuíam estruturas de interconexão robustas sobre as quais os transistores eram montados, conectados e selados, conforme mostra a Figura 11.

Figura 11 – Primeiros dispositivos de lógica integrada



Fonte: IBM (2015).

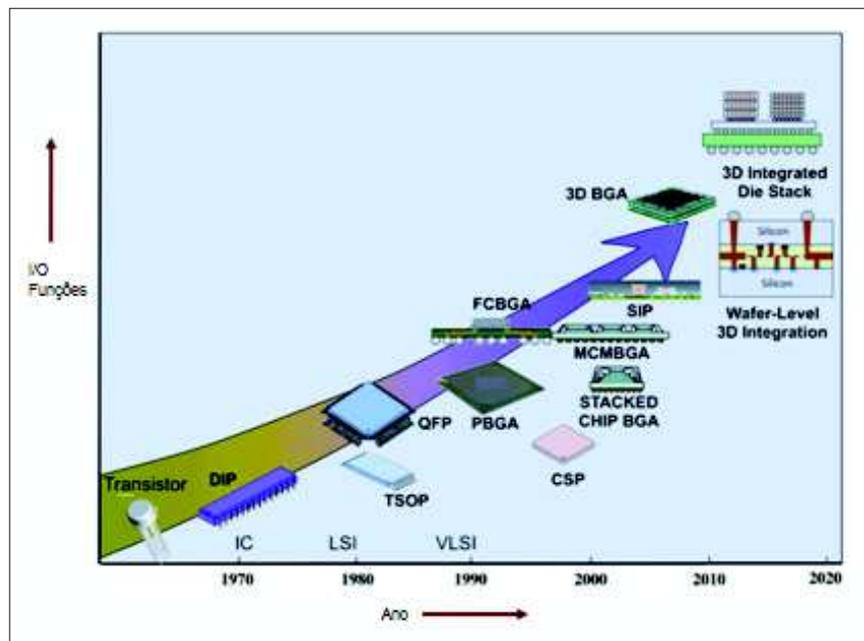
Nos anos seguintes, em 1964, a empresa Fairchild apresentou a tecnologia DIP (*Dual In-line Package*) que possibilitou a criação de padrões de pinagem resultando em

maior liberdade aos projetistas e maior flexibilidade para a realização de testes e montagens eletrônicas através do uso de soquetes padronizados.

Entre o final dos anos 70 e o início dos anos 80, o efeito combinado da explosão de consumo de equipamentos eletrônicos portáteis e a necessidade de mais portas (I/Os) nos CIs, fez com que os limites de tamanho e desempenho do DIP fossem alcançados, resultando no surgimento de uma série de novos padrões de encapsulamentos. Foi quando a tecnologia de montagem superficial (SMT), se popularizou, pois possibilitava o aproveitamento de ambas as superfícies das placas de circuito impresso (PCIs). A partir de então, as características dimensionais passaram a ganhar maior atenção e alternativas como a menor distância entre os terminais (*pitch*) e a utilização de todas as bordas do encapsulamento passaram a ser exploradas (FJELSTAD; MITCHELL, 2004).

Na década de 90 a tecnologia BGA (*Ball Grid Array*) que utiliza microesferas na parte de baixo do encapsulamento ao invés de pinos no entorno, permitiu aos CIs ainda mais I/Os por área ocupada. A Figura 12 ilustra a evolução dos encapsulamentos ao longo dos anos.

Figura 12 – A evolução dos encapsulamentos



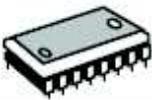
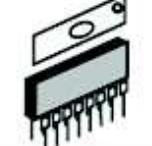
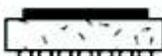
Fonte: Adaptado de Guenin (2015).

Embora a maior parte dos encapsulamentos desenvolvidos anteriormente exista até hoje, a constante necessidade de mercado por dispositivos eletrônicos com maior volume de dados, potência, velocidade e portabilidade, tornam a pesquisa e o desenvolvimento de novas tecnologias e processos relacionados aos encapsulamentos um desafio contínuo. O encapsulamento de sistemas microeletrônicos integrados e o encapsulamento de dispositivos flexíveis são exemplos da tecnologia atual.

2.4.2 Classificação dos Encapsulamentos

Segundo Tummala (2001), de uma maneira geral os encapsulamentos podem ser classificados em duas grandes categorias, SMT e PTH, que derivam respectivamente de seus acrônimos em inglês, *surface mount technology* e *pin-through-hole*. A Figura 13 mostra alguns tipos de encapsulamentos classificados de acordo com suas categorias, PTH e SMT.

Figura 13 – Classificação dos encapsulamentos

Through Hole Packages		Surface Mount Packages	
a	 DIP (Dual In-line Package)	g	 SO or SOP (Small Out-Package)
b	 SH-Dip (Shrink DIP)	h	 CFP (Quad Flat Package)
c	 SK-DIP, SL-DIP (Skinny DIP, Slim DIP)	i	 LCC (Leadless Chip Carrier)
d	 SIP (Single In-Package)	j	 PLCC, SOJ (Plastic Leader Chip Carrier with Butt Leads)
e	 ZIP (Zig-zag In-line Package)	k	 BGA (Ball Grid Array)
f	 PGA (Pin Grid Array) or Column Package	l	 TAB (Tape Automated Bonding)
		m	 CSP (Chip Scale Package)

Fonte: Tummala (2001).

Ambas terminologias referem-se a metodologia utilizada na montagem dos encapsulamentos sobre a PCI. Os encapsulamentos cuja configuração possui pinos que podem ser inseridos nos furos da PCI são classificados como PTH, enquanto que os encapsulamentos montados sobre a superfície da PCI são classificados como SMT. Tummala (2001) cita que a principal vantagem dos encapsulamentos SMT em comparação aos PTH é que ambos os lados da PCI podem ser utilizados, portanto uma maior densidade de componentes por área pode ser obtida. Alternativamente, os encapsulamentos de CIs podem ser classificados ainda quanto ao tipo de material utilizado em seu invólucro (ex: plásticos e cerâmico), e também quanto ao tipo de conexão (ex: periférica ou área).

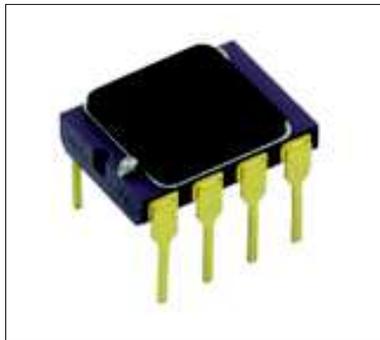
2.4.3 Tipos de Encapsulamento

Nos itens a seguir é feita uma breve apresentação acerca de alguns dos principais tipos de encapsulamentos existentes.

2.4.3.1 DIP (*Dual In-line Package*)

O encapsulamento DIP tem um formato característico retangular com duas fileiras de terminais “pinos” em suas extremidades mais longas para a montagem PTH com a PCI. Um sensor magnético com este encapsulamento é visto na Figura 14.

Figura 14 – Sensor magnético AMR com DIP cerâmico para altas temperaturas



Fonte: Honeywell (2015).

Este encapsulamento é encontrado no material plástico e cerâmico. Devido as suas limitações frente a outros tipos de encapsulamento, o DIP vem sistematicamente perdendo espaço nos últimos anos.

2.4.3.2 SOP (*Small Outline Package*)

Também conhecido como SOIC (*Small Outline Integrated Circuit*), o encapsulamento SOP (Figura 15) tem um processo de fabricação semelhante ao DIP, porém usualmente apresenta menores dimensões.

Figura 15 – Sensor magnético GMR em encapsulamento SOIC



Fonte: NVE (2015).

Diferente do DIP, o SOP possui montagem SMT, o que segundo Tummala, Rymaszewski e Klopfenstein (1997) lhe confere melhor performance nas aplicações do que o DIP, devido a maior densidade de encapsulamento alcançada e a conseqüente diminuição dos atrasos de propagação de sinal entre os componentes do circuito. Os encapsulamentos SOPs apresentam um formato típico retangular e são conhecidos pelos seus terminais *gull wing*, em referência ao formato de “asa de gaivota”, embora existam também outros formatos de terminais.

2.4.3.3 QFP (*Quad Flat Pack*)

O encapsulamento QFP, assim como o SOP, também utiliza terminais de conexão periférica, porém neste caso, os terminais ocupam as quatro laterais do encapsulamento, que se destaca pelo seu formato típico quadrado.

O QFP utiliza montagem SMT e possui terminais do tipo *gull wing*, porém são encontradas no mercado diversas variações, um exemplo é o encapsulamento QFN (*Quad Flat No Leads*) mostrado na Figura 16, que não possui terminais salientes em suas bordas.

Figura 16 – Micro sensor magnético Hall em encapsulamento QFN



Fonte: Allegro (2015).

2.4.3.4 BGA (*Ball Grid Array*)

O BGA é um tipo de encapsulamento SMT onde um arranjo de microesferas de solda na área da parte inferior do encapsulamento faz a conexão com a PCI. Este tipo de conexão permite obter maior densidade de terminais quando comparado a encapsulamentos com conexão periférica. Tummala (2001) cita que o tamanho, a performance térmica e elétrica, e a facilidade de montagem, são algumas das vantagens do BGA em comparação a outros encapsulamentos, como o QFP. A figura a seguir mostra um sensor magnético com encapsulamento BGA.

Figura 17 – Magnetômetro de 3 eixos com encapsulamento do tipo BGA



Fonte: Isentek (2015).

2.4.3.5 WLCSP (*Wafer Level Chip Scale Package*)

No WLCSP o processo de encapsulamento é integrado a fabricação do chip, diferente dos processos tradicionais onde a montagem do encapsulamento é realizada após a separação dos chips da lâmina de silício (*wafer*). No *Application Note* AN3846 da Freescale (2012) consta que a principal diferença deste tipo de encapsulamento para o BGA é que não existem elementos intermediários de interconexão entre o chip e as microesferas, resultando em indutâncias menores, maior eficiência térmica e dimensões próximas as do próprio chip. A Figura 18 mostra um sensor com encapsulamento WLCSP.

Figura 18 – Sensor Hall com encapsulamento do tipo WLCSP



Fonte: AMS (2015).

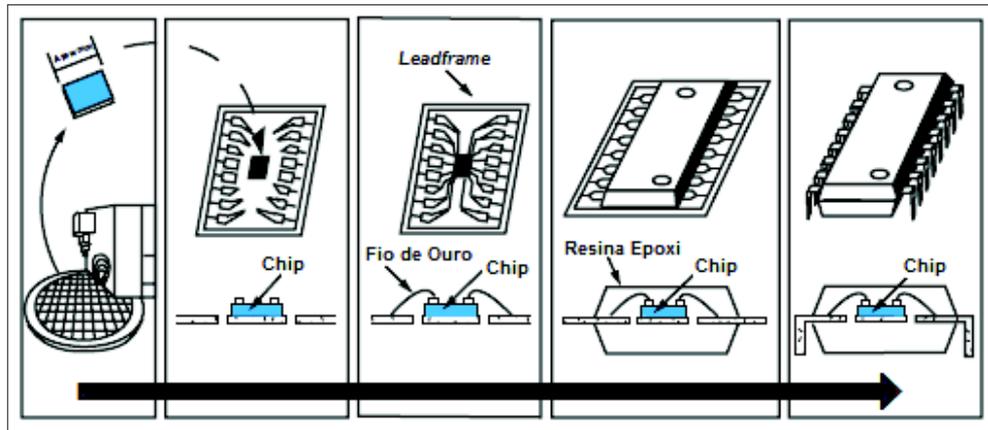
2.4.3.6 COB (*Chip on Board*)

No COB o chip é montado diretamente sobre a PCI ou substrato e coberto com uma resina para a proteção. Segundo Tummala (2001) o COB é bastante utilizado em dispositivos que integram mais de um componente, como por exemplo os módulos *multichip* (MCM). Além disso, o COB pode ser associado a diferentes processos de montagem (*wire bond*, *flip chip* ou TAB).

2.4.4 Processos de Fabricação

O encapsulamento de um chip envolve diversas etapas de produção, que variam em função das tecnologias adotadas durante o processo e dos tipos de encapsulamentos produzidos. Neste trabalho o foco são os encapsulamentos plásticos, a Figura 19 ilustra de forma simplificada as etapas para a montagem de um encapsulamento do tipo DIP.

Figura 19 – Diagrama simplificado do processo de encapsulamento DIP



Fonte: Adaptado de Tummala (2001).

O processo tradicional utilizado na montagem de encapsulamentos plásticos com conexões periféricas como o DIP o SOP e o QFP, pode ser desmembrado nas seguintes etapas principais: polimento, serra, solda do chip, solda de fios, moldagem, corte e conformação e marcação.

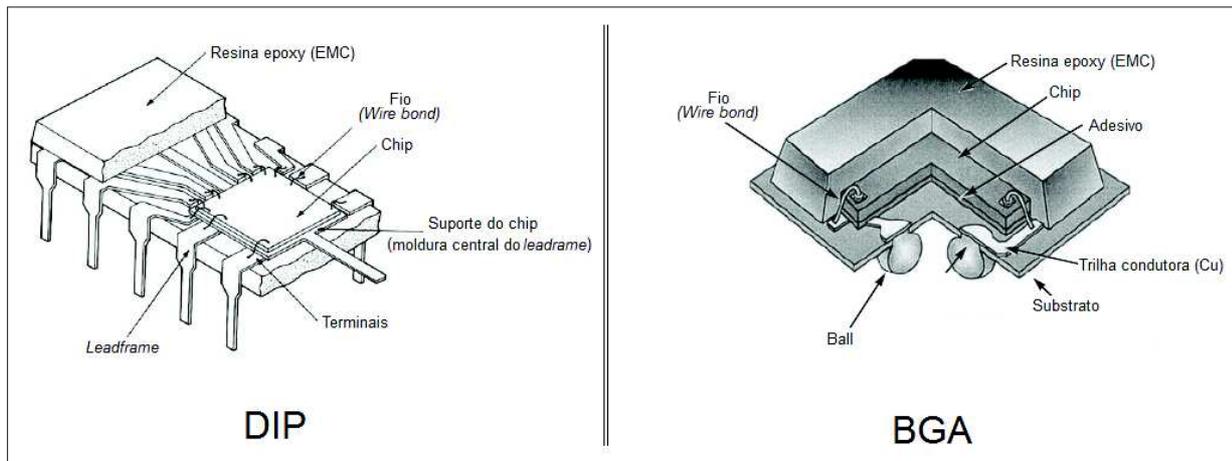
No caso do BGA substitui-se a etapa de corte e conformação por uma etapa de aplicação de esferas e corte do substrato, já o WLCSP difere dos processos tradicionais, uma vez que o encapsulamento é integrado durante a fabricação do chip. Ao final do processo de montagem, geralmente uma etapa de testes é realizada visando assegurar o correto funcionamento do componente.

A Figura 20 ilustra algumas das diversas estruturas que são agregadas durante o processo de montagem de um encapsulamento.

2.4.4.1 Polimento

A etapa de polimento, ou *back grinding* (BG), tem a finalidade de reduzir a espessura original do *wafer* até uma espessura que seja considerada adequada às demais etapas do processo e ao encapsulamento final. O polimento é um elemento chave para se obter chips cada vez mais finos e possibilitar o uso de tecnologias de encapsulamentos como o 3D *Stacking*, na qual vários chips são empilhados sob um mesmo encapsulamento (TAKYU et al., 2006). No processo convencional, o *wafer* é montado em uma moldura

Figura 20 – Representação das estruturas dos encapsulamentos DIP e BGA



Fonte: Adaptado de Kohl (2005).

e uma lâmina adesiva de proteção é colocada sobre a face onde estão os componentes, o polimento é então realizado no verso do *wafer* através do uso de discos de desbaste.

2.4.4.2 Serra

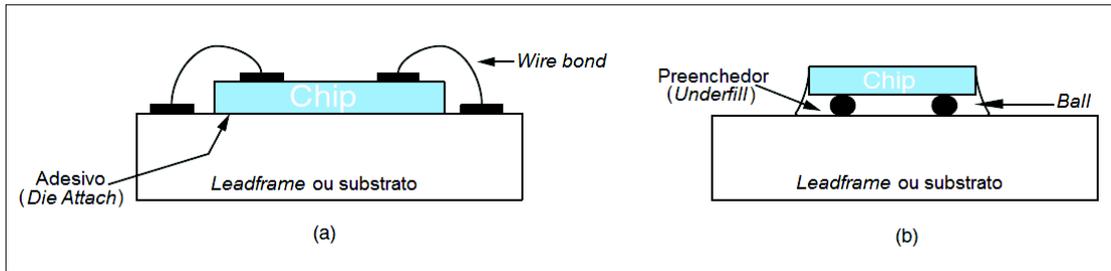
A serra ou *dicing* é a etapa na qual os chips são separados uns dos outros. Nesta etapa inicialmente uma lâmina adesiva é colocada sobre a superfície polida (verso) do *wafer* para manter a sustentabilidade aos chips, em seguida, o corte é realizado através de uma serra diamantada ou laser, sobre a face onde estão os componentes.

2.4.4.3 Solda do Chip

Após a etapa de serra o chip é colado sobre uma base, que pode ser uma moldura metálica (*leadframe*) ou um substrato, em um processo também conhecido como *die attach* (TUMMALA; RYMASZEWSKI; KLOPFENSTEIN, 1997). Os encapsulamentos do tipo SOP, assim como outros que possuem terminais metálicos utilizam o *leadframe* como base, enquanto que o substrato é utilizado principalmente em BGAs. A solda do chip pode ser feita com um adesivo viscoso aplicado por meio de um dispensador ou através de um filme adesivo colocado entre o chip e a base.

Outra forma de anexar o chip ao substrato ou ao *leadframe* é através da técnica denominada *flip chip*. Diferente do método tradicional, no *flip chip*, o chip é soldado com a face para baixo diretamente sobre os *pads* (contatos) da base. Este método dispensa a etapa seguinte de solda de fios, uma vez que as interconexões entre chip e base são feitas pelos pontos de solda. A Figura 21 ilustra os dois métodos de solda.

O *flip chip* é um método com maior custo, porém como não existe a necessidade de utilizar fios para fazer as interligações para fora do perímetro, a área do chip é melhor

Figura 21 – Solda do chip, método convencional (a) e *flip chip* (b)

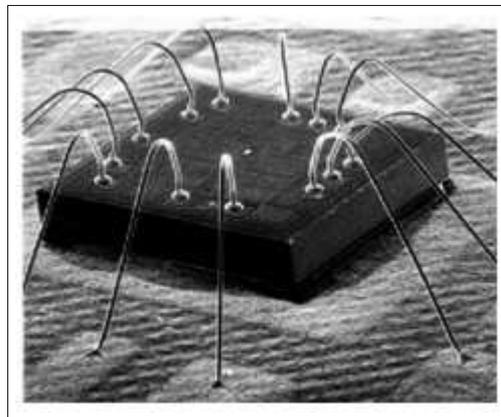
Fonte: Adaptado de Tummala (2001).

aproveitada e a dissipação térmica do chip é mais uniforme, além disso, com a redução do comprimento das interligações o desempenho elétrico do circuito é maximizado (DATTA, 2005).

2.4.4.4 Solda de Fios

A solda de fios ou *wire bonding* é o meio pelo qual são feitas as interconexões entre o chip e a base, quando utilizado o método convencional de solda de chip.

Figura 22 – Solda de fios em um chip



Fonte: Greig (2007).

Conforme visto na Figura 22, o *wire bonding* constitui-se basicamente de fios condutores soldados um a um, em uma extremidade sobre o *pad* do chip (*ball bonding*) e na outra sobre o *pad* da base (*wedge bonding*). Trata-se de uma técnica já bem estabelecida que utiliza equipamentos automáticos de alto rendimento (TUMMALA, 2001).

2.4.4.5 Moldagem

O processo de moldagem origina o invólucro que dá o formato característico ao encapsulamento e protege o chip do ambiente externo. Nos encapsulamentos plásticos, diferentes tipos de polímeros podem ser utilizados, o processo de moldagem usual utiliza

uma pré-forma (normalmente uma resina epóxi) que é aquecida até liquefazer e após é transferida para o molde por pressão (TUMMALA; RYMASZEWSKI; KLOPFENSTEIN, 1997).

O encapsulamento COB não faz uso de uma pré-forma, neste caso, a resina é aplicada líquida sobre o chip em um processo denominado *glob top* ou através de um processo denominado *dam and fill* onde primeiramente uma borda é feita ao redor do chip para evitar o espalhamento da resina.

2.4.4.6 Corte e Conformação

O corte e conformação é um processo específico dos encapsulamentos que utilizam *leadframe*, trata-se da separação e dobra dos terminais metálicos que compõem o encapsulamento.

2.4.4.7 Aplicação de Esferas e Corte do Substrato

A aplicação de esferas (*ball mount*) e o corte do substrato (*singulation*), configuram uma etapa específica dos encapsulamentos do tipo BGA. Diferentes técnicas podem ser utilizadas para a aplicação das esferas, que são alocadas sobre o verso do substrato utilizado como base para o chip (LEE, 2002). O corte do substrato ocorre após a aplicação das esferas, através de serra mecânica.

2.4.4.8 Marcação

Na marcação ou carimbo os dados de identificação do chip são gravados sobre o encapsulamento, geralmente através de laser.

2.4.5 Materiais e Propriedades

A fim de permitir que as funções de um encapsulamento sejam correspondidas e viabilizar as diferentes etapas de fabricação, diversos materiais e compostos são empregados em sua estrutura. A título de exemplo, pode-se relacionar alguns materiais bastante utilizados em função das partes que o compõem:

- Fios: Au, Al e Cu;
- Pastas de solda: Sn/Ag, Sn/Ag/Cu;
- *Leadframe*: Cu e ligas Fe/Ni (*Alloy 42*) e Fe/Cu;
- Substratos: laminados de epóxi com fibra de vidro (FR4) e cerâmicas
- Material encapsulante (molde): composto epóxi, poliimida, silicone.

A seleção de um material, seja para qual for a aplicação, deve ser guiada por suas propriedades. Estas propriedades são determinadas pela estrutura molecular, pelos átomos que constituem esta estrutura e suas interações, e também pelos efeitos extrínsecos, tais como impurezas. Segundo Tummala (2001) as propriedades mais relevantes para os encapsulamentos são a condutividade térmica e elétrica, o coeficiente de expansão térmica (CTE), a permissividade elétrica, a temperatura de transição vítrea e o módulo de Young. O autor cita também, que outras características como a estabilidade térmica, adesividade e a absorção de umidade, também ditam a utilidade do material.

O ANEXO A apresenta uma relação com os materiais mais utilizados nos encapsulamentos em função de suas principais propriedades, as quais são descritas nas seções a seguir.

2.4.5.1 Condutividade Elétrica

Quando um campo elétrico é aplicado sobre um condutor, os elétrons se deslocam para o potencial positivo, o que resulta em uma corrente. A condutividade elétrica é a relação entre densidade de corrente e o campo elétrico aplicado, expressa pela seguinte equação:

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \quad (2.21)$$

onde, \mathbf{J} é a densidade de corrente (A/m^2), σ corresponde a condutividade elétrica do material ($\text{Ohm}^{-1}\text{m}^{-1}$) e \mathbf{E} é a intensidade do campo elétrico (V/m).

Pode-se dizer que a condutividade elétrica (σ) expressa a facilidade com que o material é capaz de conduzir corrente elétrica. A condutividade elétrica depende do material e da temperatura e é geralmente, mas nem sempre, independente da tensão aplicada (TUMMALA, 2001).

Em geral os metais são bons condutores, enquanto que os polímeros e as cerâmicas podem ser classificados como bons isolantes (dielétricos). O inverso da condutividade elétrica é a resistividade (ρ), que também é muito utilizada para caracterizar os materiais selecionados.

A condutividade elétrica é limitada pelas colisões entre os elétrons e as imperfeições na estrutura do condutor, essas colisões fazem com que os elétrons percam a sua energia resultando no efeito de aquecimento Joule, que também se manifesta como uma resistência elétrica, isso explica por que a resistência, em quase todos os metais, aumenta com a temperatura.

Segundo Tummala (2001), o encapsulamento requer a utilização de materiais classificados como melhores isolantes e melhores condutores. A condutividade elétrica dos materiais sólidos varia em cerca 25 vezes de um bom isolante como a sílica para um bom condutor como o cobre e a prata.

2.4.5.2 Permissividade Elétrica

Segundo Pallas-Areny e Webster (2001) a permissividade elétrica (ε) é determinada pela relação entre a densidade de fluxo elétrico (\mathbf{D}) e a intensidade do campo elétrico (\mathbf{E}), conforme a equação (2.22):

$$\varepsilon = \frac{\mathbf{D}}{\mathbf{E}} \quad (2.22)$$

Quando um campo elétrico é aplicado sobre um material dielétrico, as cargas positivas são deslocadas para o lado negativo do campo elétrico e vice-versa, este deslocamento induz a uma polarização interna e conseqüentemente a uma maior densidade de fluxo elétrico no interior do material em relação ao vácuo (TUMMALA, 2001). A permissividade relativa ou constante dielétrica indica a relação entre a permissividade de um determinado material dielétrico com a do vácuo, sendo:

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \quad (2.23)$$

onde, ε_r corresponde a constante dielétrica, ε é a constante do material e ε_0 a constante do vácuo ($8,85418782 \times 10^{-12}$ F/m).

A constante dielétrica do vácuo corresponde a 1, todos os materiais dielétricos têm uma constante dielétrica superior a 1, quanto maior o valor, maior a energia armazenada por unidade de volume e mais lenta a onda eletromagnética propaga pela linha de transmissão (GREIG, 2007). Condutores com seus elétrons livres, não tem moléculas polarizadas e portanto possuem valor de constante igual a do espaço livre (WENTWORTH, 2009).

Wentworth (2009) cita que o termo constante dielétrica, apesar de muito utilizado é um tanto ilusório por não ser realmente constante, já que seu valor pode variar com a temperatura e frequência. Para Tummala (2001) a constante dielétrica é um das mais importantes propriedades relacionadas ao encapsulamento de sistemas microeletrônicos, porque o atraso na propagação do sinal nas interconexões elétricas está diretamente relacionado com a constante dielétrica do meio de propagação. A velocidade de propagação do sinal é dada pela equação a seguir:

$$v_p = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_r}} \quad (2.24)$$

onde, v_p corresponde à velocidade de propagação do sinal, c é a velocidade da luz ($\approx 300.000\text{km/s}$), e ε_r é a constante dielétrica, portanto, quanto maior o valor da constante mais lento o sinal irá se propagar.

2.4.5.3 Condutividade Térmica

A condutividade térmica expressa a capacidade de um material de conduzir calor, materiais com alta condutividade térmica conduzem calor de forma mais eficiente que os materiais com baixa condutividade térmica (CENGEL, 2003).

A quantidade de calor transferido através de um material por unidade de tempo é definida como o fluxo de calor (\dot{Q}), que é proporcional ao gradiente de temperatura (dT/dx). A razão entre o fluxo de calor e o gradiente de temperatura é a condutividade térmica (k) expressa em $W/m \cdot K$:

$$\dot{Q}_{cond} = -kA \frac{dT}{dx} \quad (2.25)$$

onde, A corresponde a área do meio condutivo e x é a direção do fluxo de calor.

2.4.5.4 Convecção Térmica

A convecção é o mecanismo de transferência de energia entre uma superfície sólida e um fluido (líquido ou gás) adjacente em movimento quando existe diferença de temperatura. Quanto mais rápido o movimento do fluido, maior será a transferência de calor por convecção. (CENGEL, 2003).

A taxa de transferência de calor por convecção é proporcional à diferença de temperatura, e é convenientemente expressa pela lei de resfriamento de Newton, sendo:

$$\dot{Q}_{conv} = hA_S(T_s - T_\infty) \quad (2.26)$$

onde, h é o coeficiente de transferência de calor por convecção ($W/m^2 \cdot K$), A_S corresponde a área da superfície onde ocorre a troca por convecção, T_s é a temperatura da superfície e T_∞ é a temperatura do fluido longe da influência da superfície.

2.4.5.5 Coeficiente de Expansão Térmica

A mudança dimensional que ocorre durante o processo de aquecimento ou resfriamento de um material é caracterizada pelo coeficiente de expansão térmica (CTE). Matematicamente pode ser definido como a mudança dimensional que ocorre em função do aumento de temperatura por unidade de comprimento, de acordo com a expressão a seguir.

$$CTE = \frac{dl}{ldT} \quad (2.27)$$

Um encapsulamento é composto por diferentes materiais, que juntos devem suportar variações térmicas ao longo de um determinado intervalo de temperatura, estas variações de temperatura causam a dilatação térmica desses materiais, no entanto, eles não podem expandir-se livremente, uma vez que a integridade do encapsulamento e suas características funcionais precisam ser preservadas. Como resultado, a fim de reduzir as tensões mecânicas geradas, o CTE entre os diferentes materiais utilizados necessita ser o mais próximo possível (TUMMALA, 2001).

2.4.5.6 Temperatura de Transição Vítea

A temperatura de transição vítea (T_g) caracteriza a transição de um material amorfo de um estado frágil para um estado “borrachoso” a uma determinada temperatura. Segundo Tummala (2001), a transição vítea se manifesta por alterações drásticas em muitas das propriedades físicas do material. Os polímeros, por exemplo, estão sujeitos a tensões termomecânicas e instabilidades dimensionais quando acima da temperatura de transição vítea, deste modo, essa é uma propriedade importante nos materiais de encapsulamento.

2.4.5.7 Módulo de Young

O módulo de Young ou módulo de elasticidade, é uma propriedade mecânica e esta diretamente relacionado a força das ligações inter-atômicas do material, sendo representado pela seguinte expressão:

$$E_y = \frac{\sigma_y}{\epsilon_y} \quad (2.28)$$

onde, E_y representa o módulo de Young (GPa), σ_y corresponde a tensão aplicada e ϵ_y é o alongamento ou deformação elástica.

Materiais com ligações fortes apresentam maior rigidez e valor de módulo do que os aqueles que possuem ligações fracas e por conseguinte são mais flexíveis e possuem menor valor de módulo. Os polímeros estão entre os materiais de menor módulo de elasticidade enquanto que os materiais cerâmicos estão no outro extremo e constituem o grupo de materiais mais rígidos (CALLISTER; RETHWISCH, 2008).

Visando alcançar o objetivo principal deste trabalho, que é definir um encapsulamento dedicado para um sensor magnético, esta seção abordou os principais conceitos relacionados ao tema. Inicialmente foram abordados aspectos relacionados ao campo magnético e ao sensor, também foram vistas as principais características e tipos de encapsulamentos relacionados. Além disso, foram abordadas informações importantes sobre os materiais associados e suas propriedades. A revisão destes conceitos é fundamental para o processo de desenvolvimento e análise das propostas que serão apresentadas nas seções a seguir.

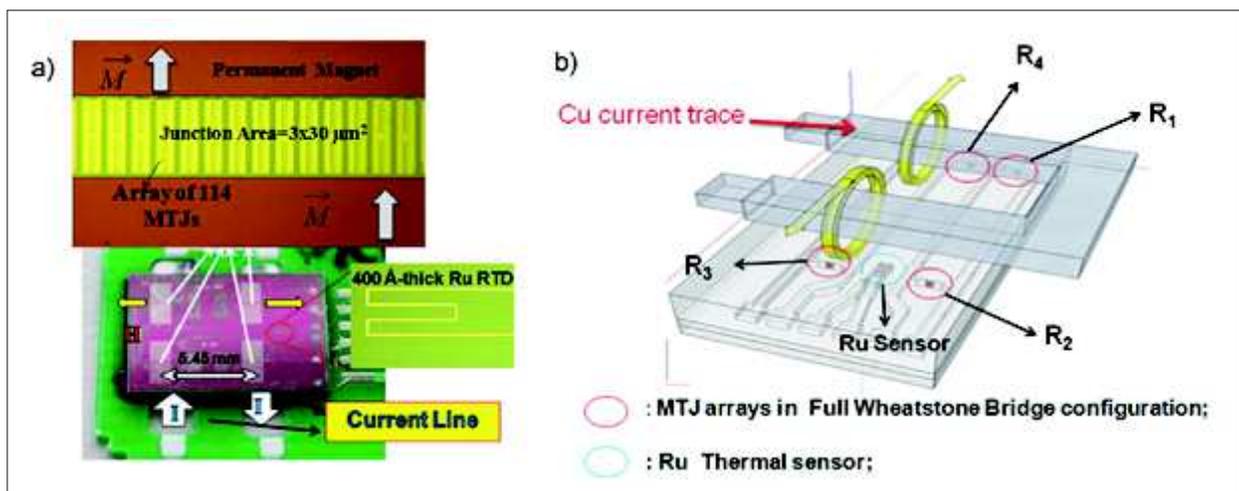
2.5 Trabalhos Correlatos

Esta seção apresenta um resumo com alguns trabalhos encontrados na bibliografia que se aproximam do tema desta dissertação. É importante mencionar que nas referências consultadas não foram encontrados trabalhos cujo foco seja a modelagem térmica ou magnética de encapsulamentos para sensores magnéticos. No entanto, além dos trabalhos apresentados nos parágrafos a seguir, convém citar que na literatura acadêmica é possível

encontrar uma grande variedade de publicações que de uma forma ou de outra também se relacionam com este trabalho, como por exemplo os trabalhos de Meng et al. (2010) e de Lin, Wong e Liu (2006), onde é realizada a modelagem térmica de encapsulamentos de CIs e os trabalhos de Ernst et al. (2014) e de Lv, Wang e Jin (2010) que lidam com a modelagem magnética em encapsulamentos específicos e outros tipos de sensores.

Lopes et al. (2013) desenvolveram em seu trabalho intitulado “*MgO Magnetic Tunnel Junction Electrical Current Sensor With Integrated Ru Thermal Sensor*”, um sensor de corrente com sensor de temperatura integrado, utilizando diversas MTJs em uma configuração conhecida como ponte de Wheatstone. O sensor foi montado sobre uma PCI, com um elemento condutor de corrente utilizado para a medição, isolado, abaixo dela. A Figura 23 mostra o dispositivo montado em (a) e sua representação gráfica em três dimensões em (b).

Figura 23 – Sensor de Lopes et al. (2013) (a) e representação gráfica (b)



Fonte: Lopes et al. (2013).

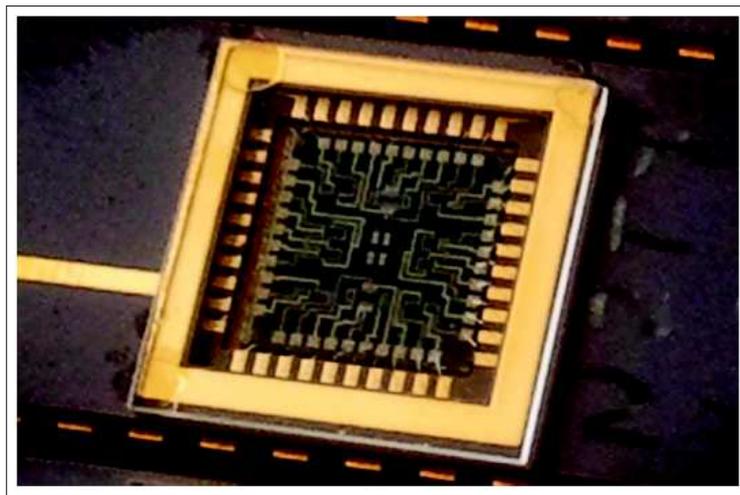
Segundo os autores, a configuração em ponte foi adotada com o objetivo de garantir a estabilidade na saída do sensor sobre uma ampla faixa de temperatura e possibilitar uma tensão nula na ausência de um campo magnético externo. Já o sensor de temperatura, foi integrado visando possibilitar o estudo do comportamento térmico do dispositivo. O dispositivo projetado apresentou uma TMR de 200% e sensibilidade de 42,6 mV/A para uma faixa de operação de $\pm 10\text{A}$ em corrente contínua. A caracterização em corrente alternada mostrou capacidade de operação de até 90 kHz para correntes de até $9,4 \text{ A}_{\text{rms}}$. Como conclusão, os autores citam que o trabalho demonstrou que o uso da tecnologia de MTJ é confiável para aplicações onde a medição de correntes elevadas é necessária, e embora uma pequena redução da sensibilidade em função da temperatura tenha sido observada, $0,04\%/^{\circ}\text{C}$, o resultado obtido foi considerado superior ao de outras tecnologias.

Cubells et al. (2013) realizaram em seu trabalho intitulado “*Magnetic Tunnel*

Junction (MTJ) Sensors for Integrated Circuits (IC) Electric Current Measurement” um estudo a partir de diferentes arranjos geométricos e quantidade de MTJs para a detecção de correntes elétricas de baixa magnitude.

No trabalho, as configurações implementadas foram caracterizadas em função da sensibilidade, resistência, corrente ($\pm 10\text{mA}$) e largura do condutor, a partir de MTJs organizadas em blocos isolados e em ponte. Entre os resultados obtidos pode-se citar que a sensibilidade relativa dos dispositivos foi mais elevada para dispositivos com mais elementos, também foi observado que quanto mais estreito o condutor de corrente maior a concentração de campo no sensor. Cabe destacar que os sensores foram implementados utilizando encapsulamento DIP sendo as conexões feitas através de *wire bonding*. A Figura 24 exibe em detalhe a cobertura de vidro colocada sobre um dos chips testados. Os autores citam que não foi utilizado silicone para o preenchimento da cavidade a fim de evitar stress térmico.

Figura 24 – Detalhe do encapsulamento DIP implementado em Cubells et al. (2013)



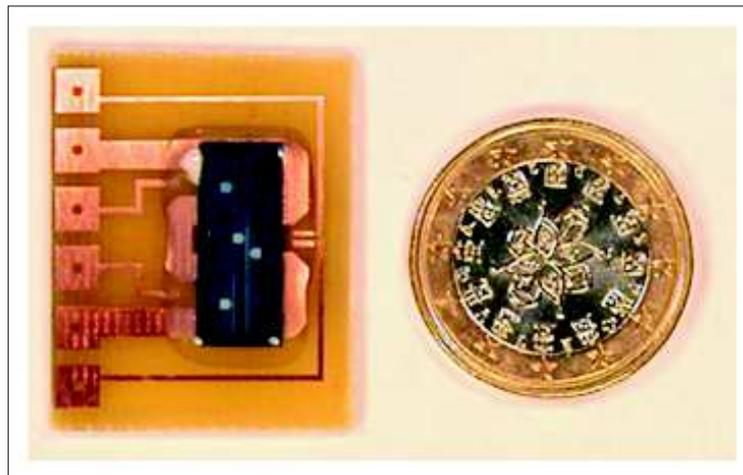
Fonte: Cubells et al. (2013).

Sánchez et al. (2012) também implementaram um sensor de corrente utilizando MTJs em ponte de Wheatstone. No trabalho, intitulado “*Electrical Characterization of a Magnetic Tunnel Junction Current Sensor for Industrial Applications*”, cada um dos quatro elementos da ponte de Wheatstone foi composto por diversas MTJs conectadas em série, e o condutor, utilizado como elemento de medição, colocado sob a PCI. O dispositivo apresentou uma TMR de 120% e sensibilidade de $9,8 \text{ mV/A}$ para uma faixa de operação de $\pm 30\text{A}$ em corrente contínua. Para correntes alternadas de até $7,5 \text{ A}_{rms}$, a frequência máxima observada foi de 200 kHz , limitada pelo sistema utilizado para a caracterização. Segundo os autores, o trabalho mostrou que as MTJs são uma tecnologia promissora em áreas onde a medição de correntes é crítica, por outro lado, pesquisas complementares são necessárias para aprimorar a caracterização em corrente alternada e reduzir a pequena histerese apresentada pelo dispositivo.

No trabalho “*Geometry Optimization of TMR Current Sensors for On-Chip IC Testing*” de Phan et al. (2005), um sensor de corrente, utilizando MTJs associadas em ponte de Wheatstone, foi implementado para operar em uma faixa de $\pm 1\text{mA}$. A influência da geometria do sensor em parâmetros como sensibilidade, histerese e aumento de temperatura foi analisada com o objetivo de otimizá-lo para o uso embarcado em micro-sistemas como CIs e MRAMs. A sensibilidade alcançada foi de $1,03\text{ mV/mA}$.

Reig et al. (2004) também desenvolveram um sensor em ponte, porém com outra tecnologia, a válvula spin, cujo efeito associado é o de GMR. No trabalho, chamado “*Design, Fabrication, and Analysis of a Spin-Valve Based Current Sensor*” todos os elementos da ponte foram fabricados ao mesmo tempo, sob processos como deposição e litografia, visando minimizar as diferenças entre eles e tornar o processo de fabricação mais rápido e barato. Além da fabricação dos elementos de GMR, a implantação e a caracterização de diferentes protótipos para correntes de até 5A também foi realizada. A Figura 25 mostra um protótipo produzido com um encapsulamento do tipo *Chip On Board* (COB), cujo o molde é aplicado diretamente sobre a PCI.

Figura 25 – Protótipo de sensor de corrente produzido por Reig et al. (2004)

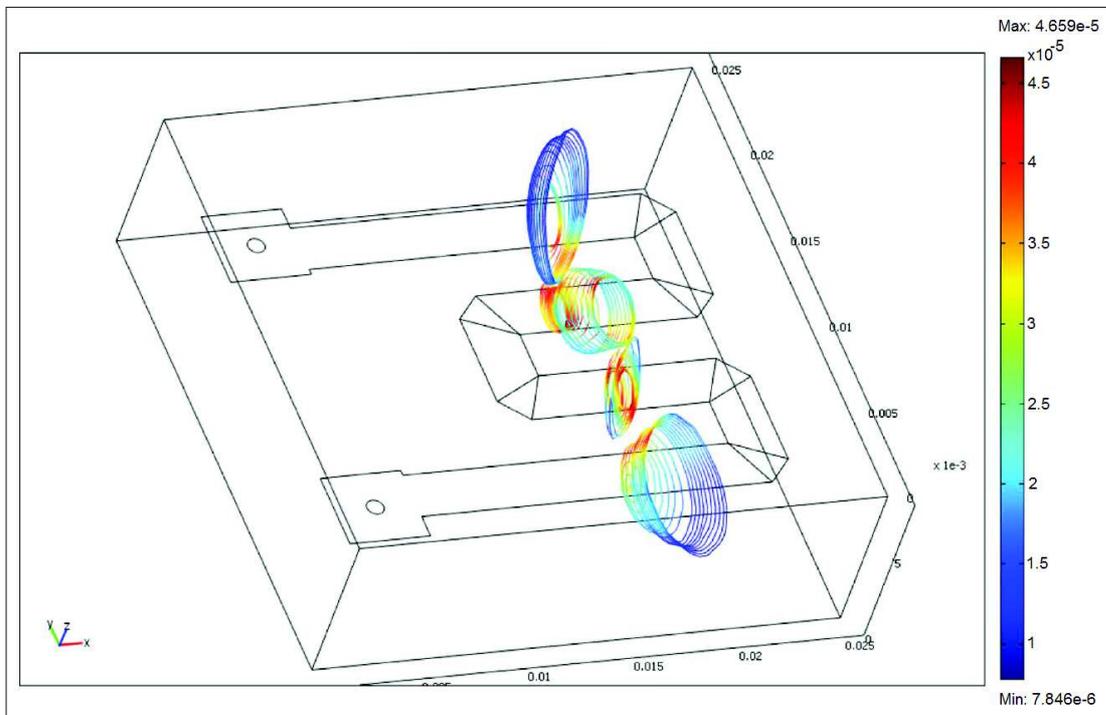


Fonte: Reig et al. (2004).

Beltran et al. (2007) realizam em seu trabalho “*Modeling of Magnetoresistive-Based Electrical Current Sensors: A Technological Approach*” uma simulação em software através do método dos elementos finitos (MEF) para o sensor de corrente desenvolvido por Reig et al. (2004). Os principais objetivos do trabalho foram a validação do modelo em função dos resultados experimentais e o estudo dos principais aspectos envolvidos no processo de fabricação do sensor, deste modo, uma análise em função da corrente, frequência e posicionamento do sensor foi feita. Os autores concluem que o modelo implementado pode ser facilmente aplicado para quantificar os efeitos causados por imperfeições durante o processo de fabricação, como por exemplo, deslocamentos laterais e desvios de inclinação, encurtando deste modo, o processo de prototipagem final. Além disso, sua aplicação não

se limita aos aspectos geométricos, podendo ser estendida para características elétricas. A Figura 26 mostra uma imagem produzida pela ferramenta utilizada com a simulação das linhas de fluxo relativas a intensidade de campo magnético.

Figura 26 – Simulação do campo magnético realizada em Beltran et al. (2007)



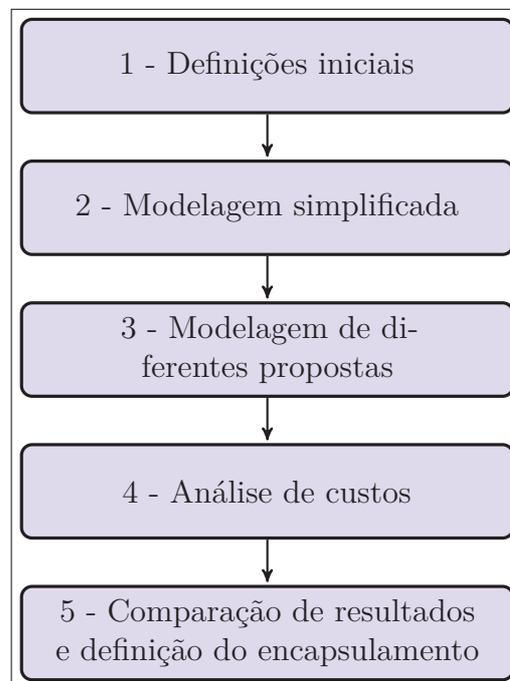
Fonte: Beltran et al. (2007).

Ao final deste capítulo foram apresentados alguns trabalhos de pesquisa já realizados, que embora compartilhem de aplicação semelhante, revelam uma carência com relação ao estudo do comportamento deste tipo de sensor em função do encapsulamento. Deste modo, no capítulo a seguir é definida uma metodologia para o desenvolvimento deste trabalho, cujos objetivos compreendem uma análise criteriosa a respeito da relação entre o encapsulamento e o elemento sensor.

3 Metodologia

Segundo Roloff e Adur (2004), uma metodologia pode ser definida como uma abordagem organizada visando atingir um objetivo através de passos preestabelecidos, podendo ser considerada um roteiro para desenvolvimento estruturado de projetos, visando a qualidade e a produtividade. Assim, a fim de alcançar os objetivos propostos neste trabalho, foram formuladas algumas etapas para o seu desenvolvimento. O fluxograma a seguir exibe estas etapas.

Figura 27 – Fluxograma com plano de execução do trabalho proposto



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os itens apresentados a seguir descrevem resumidamente cada uma das etapas.

1. Definições iniciais

A primeira etapa visa definir alguns aspectos gerais que constituem a base necessária para o prosseguimento do trabalho, como por exemplo a definição dos materiais que serão utilizados e de suas propriedades, e a validação destes dados e dos demais parâmetros necessários para as simulações no software. Para isto, será realizada uma comparação com alguns modelos térmicos e magnéticos cujos os resultados são conhecidos. Esta etapa será dividida nos seguintes itens:

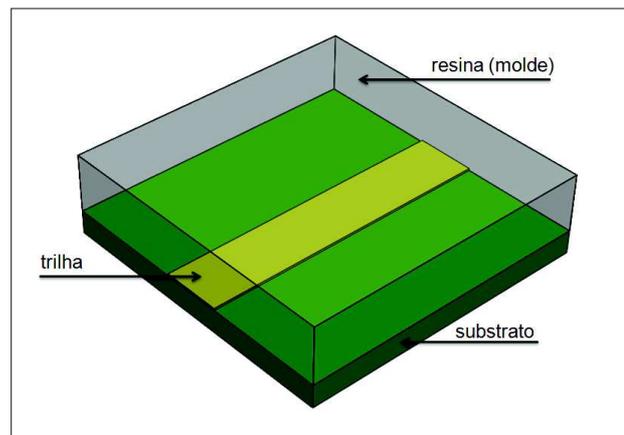
- (a) definição das ferramentas utilizadas e do fluxo de trabalho;

- (b) definição dos materiais utilizados e de suas propriedades;
- (c) validação inicial dos modelos.

2. Modelagem de um encapsulamento simplificado

Nesta etapa será modelado um encapsulamento simplificado, conforme exibido na Figura 28. Neste modelo, através de pequenas variações em sua geometria, como por exemplo, na largura e no posicionamento das trilhas, serão analisados os comportamentos térmico e magnético em função de diferentes correntes simuladas. Nesta análise, os resultados obtidos com as simulações serão agrupados e classificados de acordo com os critérios de funcionamento do sensor, com o objetivo de guiar o desenvolvimento das propostas de encapsulamento que serão implementadas na etapa seguinte.

Figura 28 – Modelo de encapsulamento simplificado



Fonte: Elaborado pelo autor.

3. Modelagem em diferentes propostas de encapsulamento

Nesta etapa serão simuladas diferentes propostas para o encapsulamento do sensor. As simulações terão como foco as interações magnéticas e térmicas ocorridas entre os elementos do encapsulamento, como por exemplo as trilhas de corrente e a célula MTJ. As propostas serão projetadas no software de desenho SolidWorks® e exportadas para o software COMSOL® e serão baseadas em dois tipos de encapsulamentos: o COB e o SOP. De forma semelhante a etapa anterior, diferentes níveis de intensidade de corrente serão simulados, no entanto, neste caso, os valores de corrente e as características dos condutores serão selecionados levando-se em consideração os resultados obtidos com o encapsulamento simplificado. Para a análise, os dados obtidos serão organizados em tabelas e classificados de acordo com critérios como

temperatura de operação e detecção do campo magnético pelo sensor. O objetivo desta etapa é caracterizar as propostas quanto a faixa de operação, em relação aos possíveis níveis de detecção de corrente pelo dispositivo encapsulado e também quanto a sensibilidade magnética e ao desempenho térmico, visando assim, possibilitar a classificação destas na etapa final.

4. Breve Análise dos Custos Envolvidos

Os custos relacionados aos encapsulamentos variam em função das diferentes características, materiais utilizados e das tecnologias de fabricação. Assim sendo, nesta etapa será feita uma breve análise a respeito dos principais custos de produção envolvidos em cada proposta. O objetivo é permitir classificar as propostas também quanto a viabilidade econômica dos diferentes encapsulamentos avaliados no trabalho.

5. Comparação de resultados e definição de uma das propostas

Na última etapa será realizada a comparação dos resultados obtidos nas duas etapas anteriores (modelagem e custos), com o objetivo de classificar as propostas e elencar uma delas como a mais apropriada para a aplicação. Para a análise serão utilizadas tabelas e gráficos comparativos.

4 Desenvolvimento e Resultados

Neste capítulo será apresentado o desenvolvimento do trabalho e realizada a análise dos resultados. Os tópicos a seguir estão organizados de acordo com as etapas previstas na metodologia apresentada anteriormente.

4.1 Definições Iniciais

Algumas definições são fundamentais para as demais etapas do trabalho, elas envolvem por exemplo a escolha de ferramentas, materiais e valores de variáveis, conforme apresentado a seguir.

4.1.1 Ferramentas Utilizadas e Fluxo de Trabalho

Sendo as simulações térmica e magnética os meios utilizados para atingir os objetivos específicos deste trabalho, é natural que a definição das ferramentas de software seja uma das etapas iniciais do desenvolvimento. Entre as ferramentas disponíveis no laboratório de modelagem (Modelab) da UNISINOS, foram adotadas as seguintes:

- SolidWorks® CAD 3D, software de desenho assistido por computador que possibilita a criação de elementos tridimensionais e será utilizado para a geração da maior parte dos modelos utilizados;
- COMSOL®, será o software utilizado para as simulações, capaz de modelar fenômenos físicos diversos. Esta ferramenta se baseia no método de elementos finitos (MEF) para a resolução de problemas. O MEF é um método numérico utilizado para resolver equações diferenciais que representam diferentes problemas de engenharia, sendo popular por se adequar em programas computacionais versáteis para a resolução de problemas práticos (KIM; SANKAR, 2011);

O fluxo de trabalho estabelecido é bastante simples; primeiramente será realizada a implementação gráfica do modelo e após será feita a simulação. A análise poderá ser feita na própria ferramenta de simulação, ou quando necessário, exportando-se os dados obtidos para planilhas eletrônicas.

4.1.2 Materiais Utilizados e Propriedades

Segundo Pryor (2011) a seleção apropriada dos materiais e suas características compreendem uma das mais importantes tarefas realizadas durante os estágios preliminares

da simulação, devendo ser iniciada após se definir uma aproximação inicial do dispositivo que será modelado. Ainda, segundo o autor, uma boa aproximação inicial é aquela cuja declaração do problema incorpora todas as propriedades físicas essenciais (de primeira ordem) e funcionais do dispositivo ou processo a ser modelado.

Considerando que uma aproximação inicial do dispositivo já foi estabelecida, uma vez que já existe uma ideia de encapsulamento, mesmo que de forma simplificada e considerando também que o problema investigado também já é conhecido, o próximo passo foi definir os materiais e suas características.

O software utilizado para realizar as simulações (COMSOL[®]) possui uma biblioteca com diversos materiais associados; os materiais adotados para o desenvolvimento deste trabalho, bem como a maior parte de suas propriedades terão como base esta biblioteca.

Com base no modelo simplificado de encapsulamento os seguintes materiais podem ser identificados: resina (molde), cobre (trilhas condutoras) e substrato (base). O ouro também será incluído visando sua utilização nas propostas de encapsulamentos seguintes.

Para as simulações de campo magnético, as propriedades exigidas pelo software são a permeabilidade relativa (μ_r), permissividade relativa (ϵ_r) e a condutividade elétrica (σ), enquanto que para as simulações térmicas, além das propriedades elétricas já citadas, são necessárias as informações referentes a condutividade térmica (k), capacidade térmica (Cp) e a densidade do material.

Embora os materiais citados estejam presentes na biblioteca do software, nem todas as suas propriedades possuem valores associados, sendo necessário portanto complementar estas informações. A maior dificuldade para a definição das propriedades foi a resina epoxy utilizada no molde, também conhecida como EMC do inglês *Epoxy Moulding Compound*. A resina é na verdade um composto cuja formulação varia conforme o fabricante e uma vez que as suas propriedades não são completamente descritas nas fichas comerciais, optou-se por adotar valores encontrados em diferentes fontes, relacionadas nos itens a seguir:

- Permissividade relativa, retirada do trabalho “*Effect of Epoxy Molding Compound on the Electrical Performance of Microelectronic Devices*” de Herbsommer (2012);
- Condutividade elétrica, capacidade térmica, densidade e CTE retiradas do trabalho “*Thermally Conductive MgO-Filled Epoxy Molding Compounds*” de Wereszczak et al. (2013);
- Condutividade térmica, conforme demonstrado em Wereszczak et al. (2013) esta propriedade varia conforme a composição e o objetivo do encapsulamento. O valor adotado foi obtido no trabalho “*Effect of Package Construction on Thermal Performance of Plastic IC Packages*” de Bhandarkar et al. (1997), que é próximo ao

descrito na folha de dados do compósito produzido pela empresa MG Chemicals (2016);

- Coeficiente de Poisson, retirado de “*Modeling and simulation for microelectronic packaging assembly: manufacturing, reliability and testing*” de Liu e Liu (2011).

O coeficiente de Poisson (razão entre a deformação transversal associada a uma deformação longitudinal para um dado material) e o CTE não são propriedades obrigatórias para as simulações propostas, todavia, a fim de evitar mensagens de alerta emitidas pelo software, os campos relativos a estas propriedades também foram informados.

Para o substrato foram adotados os valores referentes as propriedades dos laminados de epóxi com fibra de vidro (FR4) citados em Tummala (2001) e Mittal (2015). Para os demais materiais as propriedades permaneceram conforme disponibilizado pela biblioteca do software. A Tabela 4 apresenta os materiais utilizados nos encapsulamentos juntamente com os valores atribuídos as suas propriedades.

Tabela 4 – Propriedades dos materiais utilizados

Materiais	Propriedades					
	σ [S/m]	μ_r -	ε_r -	k [W/(m·K)]	Cp [J/(kg·K)]	densidade [kg/m ³]
Cobre	5,998E+07	1	1	400	385	8700
Ouro	4,56E+07	1	1	317	129	19300
FR4 (substrato)	0,0001	1	4,5	0,3	1000	1500
EMC (molde)	1,00E-12	1	4	0,63	1500	1200

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.1.3 Verificação Inicial dos Modelos

Para adequar os modelos ao software, diferentes níveis de parametrização são necessários. Assim, é importante avaliar se os resultados obtidos pelo software são válidos frente a modelos cujos resultados já são conhecidos. Para isso, foram realizadas simulações específicas, cujas configurações, uma vez validadas, balizarão os modelos seguintes.

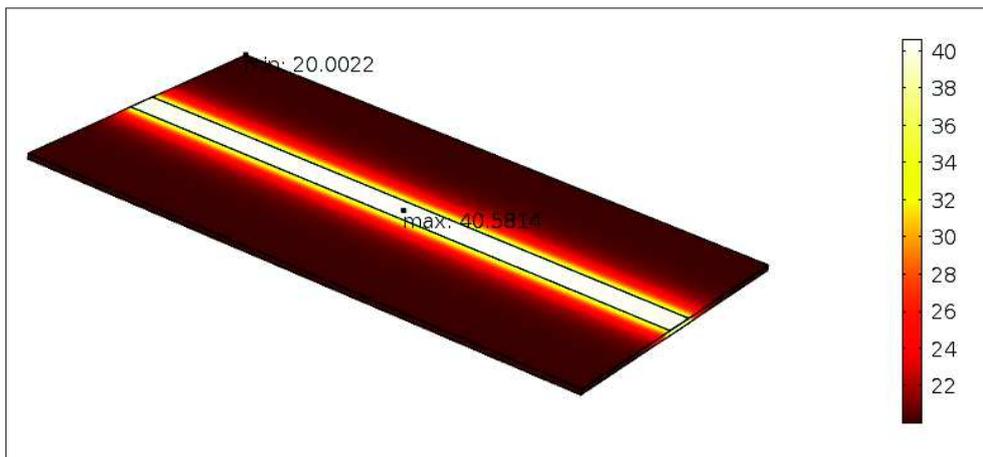
4.1.3.1 Verificação da Modelagem Térmica

Conforme foi citado nos objetivos específicos, uma das preocupações deste trabalho é a avaliação térmica em função das trilhas de corrente contidas no interior e no exterior dos encapsulamentos; de fato, as correntes nas trilhas geram calor que pode afetar o desempenho do sensor ou até mesmo alterar as características físicas do encapsulamento e seus componentes. Deste modo, é importante que as trilhas sejam dimensionadas de forma apropriada e que o calor gerado fique dentro dos limites estabelecidos.

As normas IPC, cujo nome tem origem do termo em inglês “*Institute of Printed Circuits*”, produzidas por uma associação de fabricantes da indústria eletroeletrônica estão entre as mais citadas na literatura e utilizadas pelos fabricantes de PCIs para o dimensionamento de trilhas. Como destaque pode-se citar a IPC-2221 utilizada durante mais de 50 anos e substituída em 2009 pela IPC-2152. Embora o tema seja bastante controverso, uma vez que existem diversos trabalhos que exploram o debate a respeito da real capacidade de condução das trilhas condutoras em PCIs, a preocupação nesta etapa limita-se em recriar um modelo cujos resultados já tenham sido reportados, com o objetivo de verificar se os resultados obtidos pelo software se aproximam ao esperado.

O modelo simulado foi adaptado de Adam (2004), cujo trabalho, “*New Correlations Between Electrical Current and Temperature Rise in PCB Traces*”, apresenta um estudo a respeito da capacidade de trilhas condutoras em PCIs considerando diferentes cenários. O trabalho foi escolhido para esta simulação por fornecer as informações necessárias para a implementação em software. A Figura 29 exibe o modelo simulado em °C.

Figura 29 – Modelo utilizado na verificação de simulação térmica



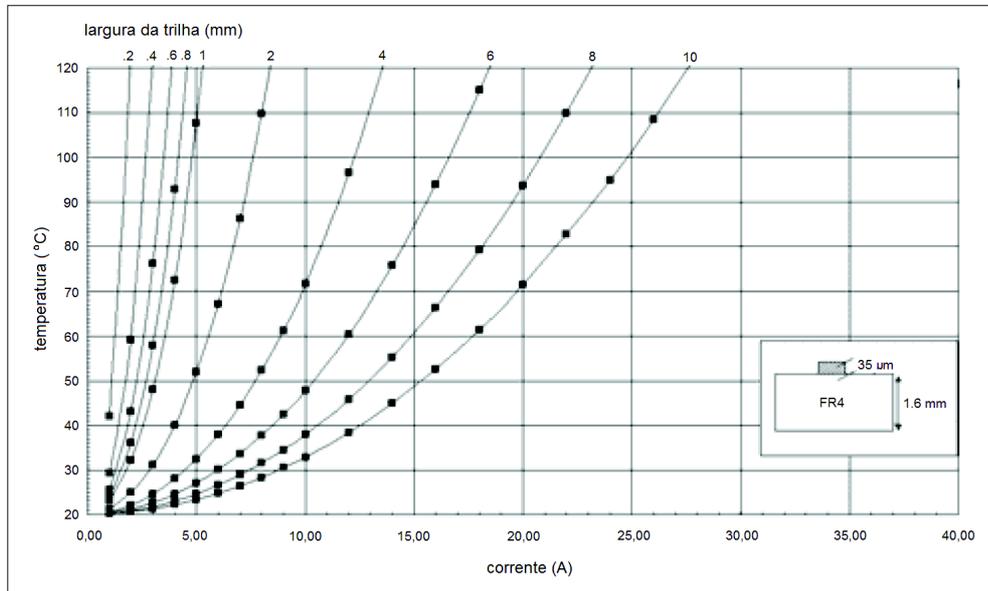
Fonte: Elaborado pelo autor.

O modelo implementado consiste basicamente em uma PCI com FR4 nas dimensões de 160mm x 100mm x 1,6mm (comprimento x largura x espessura) com uma trilha de cobre sobre ela nas dimensões de 160mm de comprimento, 0,035mm de espessura e largura variável. Para a simulação foram utilizadas as propriedades dos materiais descritas anteriormente. Também foram considerados os valores referentes ao coeficiente de convecção térmica (h) de $10\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$ e de temperatura de 20°C conforme o trabalho de referência. Cabe mencionar que o coeficiente de convecção térmica e a temperatura ambiente adotados para o restante deste trabalho serão respectivamente de $10\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$ e 25°C baseados no trabalho de Bhandarkar et al. (1997), onde segundo os autores os valores correspondem a uma situação de ar estagnado (convecção natural) e de temperatura ambiente.

Os valores esperados foram retirados do cenário apresentado em Adam (2004) que

corresponde ao modelo implementado nesta simulação, estes valores são apresentados no formato de curvas que variam em função da largura da trilha e da corrente.

Figura 30 – Curvas de capacidade de corrente para o modelo simulado



Fonte: Adaptado de Adam (2004).

Para esta simulação foram escolhidos quatro pontos representativos do gráfico com diferentes larguras de trilha e capacidades de corrente. A temperatura média obtida na simulação e a esperada com as respectivas larguras das trilhas e correntes, são apresentadas na Tabela 5:

Tabela 5 – Modelagem térmica, comparativo de resultados

Largura da trilha (mm)	Corrente (A)	Temperatura (°C)	
		Simulado	Esperado
2	4	38,45	40
4	7	43,41	44
6	10	47,41	48
10	12,6	40,45	40

Fonte: Elaborado pelo autor.

Considerando os diferentes aspectos envolvidos e o fato da curva de resposta (Figura 30) não permitir uma leitura exata das temperaturas resultantes, conforme pode ser observado na tabela 5, os valores encontrados ficaram próximos aos esperados e o resultado da simulação foi considerado satisfatório.

4.1.3.2 Verificação da Modelagem Magnética

Uma vez que a simulação magnética é parte dos objetivos específicos deste trabalho e está diretamente relacionada ao tema, é importante verificar se as variáveis envolvidas convergem para um resultado aproximado conhecido, de forma semelhante a verificação realizada para o modelo térmico.

Para esta verificação duas simulações foram realizadas, a primeira delas confronta os resultados obtidos através de um modelo simulado com os esperados obtidos através de modelo teórico. O modelo teórico consiste basicamente em calcular, através da lei de Biot-Savart, a magnitude do campo magnético que uma corrente conduzida por um fio retilíneo, infinito, no vácuo, causa em um ponto localizado a uma determinada distância em torno deste mesmo fio. Neste caso em específico, devido a simetria do problema, a equação da lei de Ampère pode ser aplicada, sendo a magnitude da intensidade do campo magnético (H) obtida pela seguinte expressão:

$$H = \frac{I}{2\pi R} \quad (4.1)$$

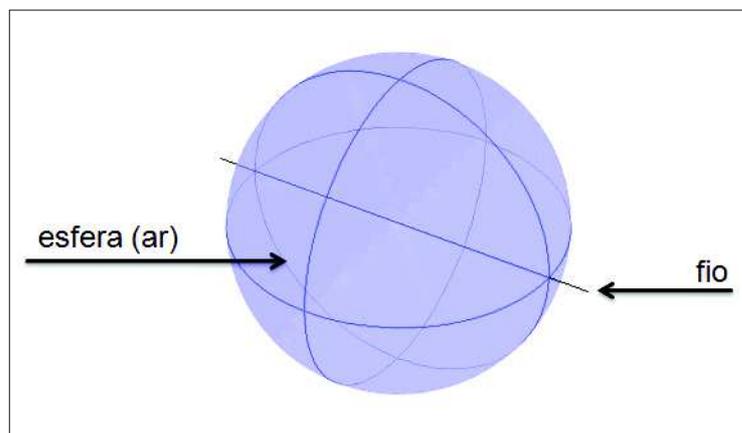
ou, em função da magnitude da densidade de fluxo magnético (B) por:

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi R} \quad (4.2)$$

onde, R representa a distância do ponto no espaço perpendicular ao fio, I é a corrente elétrica e μ_0 é a permeabilidade do vácuo que corresponde a constante ($4\pi \times 10^{-7}$ T·m/A).

O software não permite criar um fio infinito, portanto para esta simulação foi criado um modelo cujo o diâmetro (2 mm) do fio é muito menor que seu comprimento (1000 mm), conforme apresentado na Figura 31.

Figura 31 – Modelo com o fio retilíneo



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 31 mostra também uma esfera (diâmetro de 800 mm) circundando o fio de cobre, o objetivo desta esfera é representar o espaço para a propagação do campo no

entorno do fio. No caso da esfera, devido a restrição do software, ao invés de vácuo foi adotado o ar. As propriedades dos materiais utilizados estão descritas na seção 4.1.2.

Os valores calculados e os resultados obtidos com a simulação estão compilados na tabela a seguir. Assim como ocorreu na simulação térmica, foram escolhidos quatro pontos, porém, neste caso, as variáveis de entrada são a corrente e a distância do ponto.

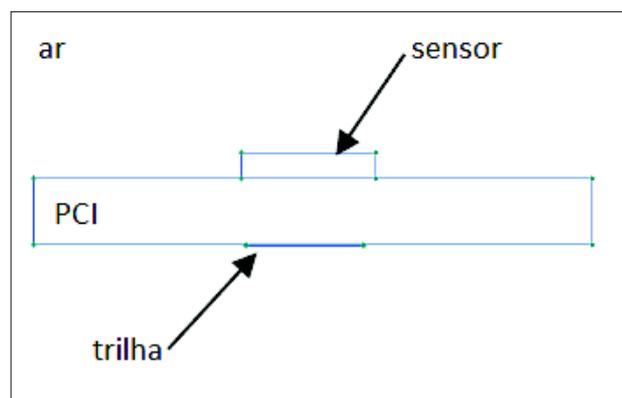
Tabela 6 – Modelagem magnética, comparativo de resultados primeira simulação

Distância do fio (mm)	Corrente (A)	Densidade de fluxo - B (mT)	
		Simulado	Calculado
5	0,5	0,020	0,020
10	1	0,020	0,020
20	5	0,049	0,050
50	10	0,040	0,040

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para a segunda simulação, um modelo mais próximo a proposta deste trabalho foi implementado. O modelo, conforme exibido na Figura 32, foi baseado no *Application Note AN105 - Simulation of Magnetic Field* retirado de Crocus (2015). No documento é realizada uma breve análise utilizando simulação em 2D do comportamento do campo magnético gerado por trilhas condutoras sobre sensores magnéticos. O software utilizado no trabalho é o “*QuickFields 6.0 Student Edition*” e uma descrição detalhada acerca dos materiais e variáveis envolvidas no modelo é apresentada, facilitando assim a implementação em outro software, como no caso desta comparação de resultados.

Figura 32 – Modelo utilizado para a segunda simulação



Fonte: Adaptado de Crocus (2015).

Na Figura 32, as dimensões (largura x altura) são de: 14mm x 1,6mm para a PCI; 3,5mm x 0,04mm para a trilha e 3,5mm x 0,7mm para o sensor.

No *Application Note AN105*, das propriedades dos componentes presentes no modelo, apenas a permeabilidade relativa (μ_r) é citada, sendo: ar = 1,00000037; PCI =

1; sensor = 1; trilha de cobre = 0,999994; semelhantes, portanto, aos valores adotados neste trabalho, descritos na seção 4.1.2. Os resultados da simulação, bem como os valores esperados, obtidos no documento de referência, estão compilados na tabela a seguir, e referem-se a distância de afastamento a partir do centro da face da trilha de cobre.

Tabela 7 – Modelagem magnética, comparativo de resultados segunda simulação

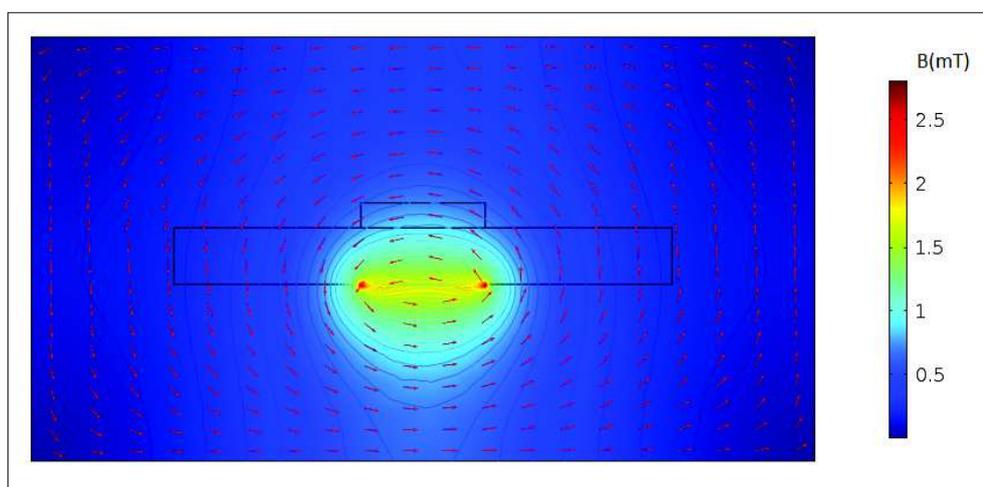
Distância da trilha (mm)	Corrente (A)	Densidade de fluxo - B (mT)	
		Simulado	Esperado
0,7	10	1,3	1,2
1,2	10	1,1	1,0
1,5	10	0,9	0,9
2,2	10	0,7	0,7

Fonte: Elaborado pelo autor.

Cabe mencionar que de forma semelhante ao modelo utilizado para verificação térmica, os resultados esperados mostrados na Tabela 7 também foram retirados de uma curva gráfica apresentada no trabalho de referência.

A Figura 33 exibe a simulação realizada onde é possível visualizar os valores aproximados da magnitude da densidade de fluxo magnético (B) ao longo do espaço, a distribuição das linhas de fluxo e a direção das mesmas (considerando o sentido da corrente na trilha saindo do plano). Também é possível perceber a maior densidade de fluxo magnético nas extremidades da trilha.

Figura 33 – Simulação realizada para a verificação da modelagem campo magnético



Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir do que foi demonstrado pelos dois modelos simulados nesta seção, é possível concluir que os resultados obtidos ficaram próximo ao esperado e podem ser considerados satisfatórios.

4.1.4 Resumo da Primeira Etapa e Considerações Finais

Durante esta primeira etapa foram definidos alguns itens fundamentais para o prosseguimento deste trabalho, como o fluxo de trabalho, conjunto de ferramentas, materiais utilizados e valores das variáveis e constantes importantes para a parametrização do modelo. Também foram realizadas simulações baseadas em modelos cujo os resultados já são conhecidos, permitindo assim avaliar a resposta aos diferentes parâmetros e configurações necessários para o funcionamento do software. A tabela a seguir apresenta um resumo com as definições desta etapa.

Tabela 8 – Resumo das definições iniciais

Softwares
SolidWorks [®] CAD 3D, COMSOL [®]
Materiais
Cobre, Ouro, FR4, EMC
Variáveis
σ , μ_r , ε_r , k, h, Cp, densidade, temperatura

Fonte: Elaborado pelo autor.

Com relação as simulações realizadas, a diferença máxima observada na verificação da modelagem térmica foi de 1,1°C , o que não representa uma preocupação, por tratar-se de um problema que envolve diferentes variáveis e também porque há uma incerteza referente a interpretação das curvas de referência de onde foram retirados os valores esperados; de modo semelhante, na verificação da modelagem magnética, os resultados também foram considerados satisfatórios, neste caso a diferença máxima observada para as duas simulações realizadas ficou em cerca de 0,1mT.

4.2 Modelagem de um Encapsulamento Simplificado

Nesta etapa será descrita a modelagem em software do modelo simplificado de encapsulamento, cujo objetivo foi avaliar, sob ponto de vista térmico e magnético, o comportamento deste modelo em função de modificações provocadas na largura e no posicionamento dos elementos condutores e também na intensidade da corrente elétrica que circula sobre eles. Os resultados obtidos com as simulações deste modelo servirão como guia para o desenvolvimento dos encapsulamentos subsequentes, reduzindo deste modo, o tempo empregado em projeto e simulação nas próximas etapas.

A intenção de utilizar um modelo simplificado de encapsulamento baseia-se na possibilidade de se explorar as vantagens de uma construção geométrica simples, como por exemplo, a possibilidade de se trabalhar com uma malha (conjunto de elementos finitos e pontos nodais do MEF) relativamente menor e com menos pontos de cálculo do que a

gerada para uma figura geométrica mais complexa, como no caso de um encapsulamento detalhado. Outra característica importante do modelo simplificado, é o fato de permitir que sua implementação seja feita inteiramente no ambiente do software de simulação, isto possibilita, por exemplo, inserir modificações dimensionais na geometria do desenho através de variáveis. Caso fosse utilizado um software para desenho, por exemplo, cada variação dimensional exigiria a criação e a importação de um novo desenho para a ferramenta de simulação.

O modelo simplificado de encapsulamento consiste basicamente de um substrato de FR4 utilizado como base, nas dimensões de 5mm x 5mm x 0,4mm (comprimento x largura x espessura), coberto por uma resina epóxi (EMC) nas dimensões de 5mm x 5mm x 1mm, com um elemento condutor cuja espessura, largura e posicionamento são variáveis.

Os casos de estudo 1 e 2 apresentados na sequência, compreendem as simulações realizadas para as combinações de corrente elétrica, largura e espessura da trilha de cobre, conforme os valores apresentados na Tabela 9, os demais casos (3, 4 e 5) são situações específicas que serão comentadas a parte.

Tabela 9 – Parâmetros combinados utilizados nos estudos de caso 1 e 2

Correntes (A)	Larguras de trilha (mm)	Espessuras de trilha (mm)
0,005	0,1	0,035 (1Oz)
0,05	0,5	0,07 (2Oz)
0,5	1	0,105 (3Oz)
1	2	
2	3	
5		
10		

Fonte: Elaborado pelo autor.

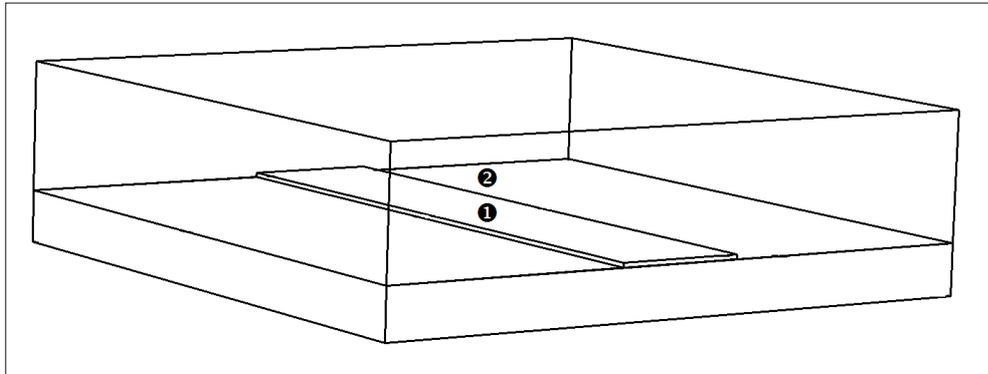
A fim de possibilitar a análise entre as diferentes combinações, como as apresentadas na Tabela 9, foram estabelecidos dois pontos comuns de medição em cada simulação, válidos tanto para a modelagem magnética quanto térmica.

- Ponto 1: posicionado junto a superfície do condutor e centralizado com relação as laterais do encapsulamento.
- Ponto 2: posicionado 0,2mm acima da superfície do substrato (trilha, no estudo de caso 1) e centralizado com relação as laterais do encapsulamento.

A escolha dos pontos foi realizada partindo-se do pressuposto que o sensor estaria posicionado na parte central do encapsulamento, sendo que, no caso específico do ponto 2, a escolha do ponto 0,2mm acima do substrato ou da trilha corresponde a altura do sensor

MTJ que será utilizado. A Figura 34 mostra um dos casos simulados, onde os dois pontos de medição, são vistos em destaque ao centro do encapsulamento.

Figura 34 – Pontos de medição para as simulações com o encapsulamento simplificado



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os materiais adotados nas simulações e suas propriedades foram definidos na seção 4.1.2, sendo que, nos casos 1,2,3 e 4, para a transmissão de calor por convecção térmica, foram consideradas apenas as superfícies laterais e superior do encapsulamento, enquanto que, no estudo de caso 5, no qual o condutor está afastado do encapsulamento, todas as superfícies foram consideradas.

Uma vez definidos os pontos de medição e as características gerais do encapsulamento, o próximo passo foi determinar parâmetros que possibilitassem realizar a análise dos diferentes casos. Para isso, foram atribuídos limites de temperatura e de densidade de fluxo magnético para os pontos de medição.

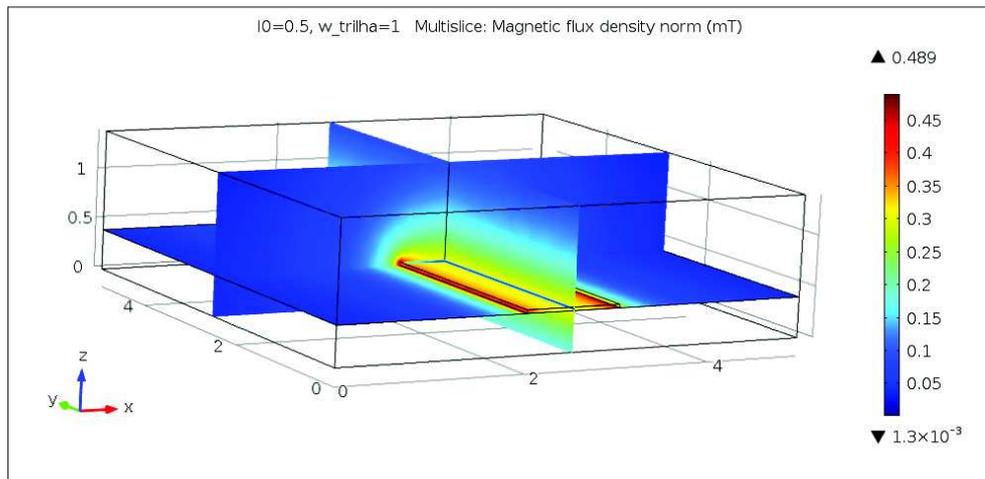
Para a modelagem térmica o limite máximo de temperatura definido para o ponto 1, nos casos (1, 2 e 3) onde o condutor utilizado é uma trilha de cobre, foi de 110°C , baseado em Adam (2004). A escolha deste valor está ligado a temperatura de transição vítrea do substrato (FR4), que em contato com a trilha aquecida pode degradar. Para o ponto 2, o limite máximo definido foi de 85°C , neste caso, o valor está relacionado a temperatura máxima de operação do sensor MTJ.

Para a modelagem magnética não foi estipulado um limite para o ponto 1, no entanto, para o ponto 2 foram estabelecidos limites de $0,2\text{mT}$ de mínimo e de 220mT de máximo. Embora o sensor tenha capacidade de operar em uma faixa de maior amplitude, estes valores visam assegurar a operação do sensor em uma faixa dinâmica linear.

4.2.1 Encapsulamento Simplificado - Estudo de Caso 1

O primeiro caso abordado teve como objetivo modelar o comportamento de uma trilha de cobre no interior do encapsulamento, ou seja, entre o substrato e o molde. A Figura 35 mostra o resultado da simulação magnética realizada.

Figura 35 – Exemplo com a simulação magnética para o estudo de caso 1



Fonte: Elaborado pelo autor.

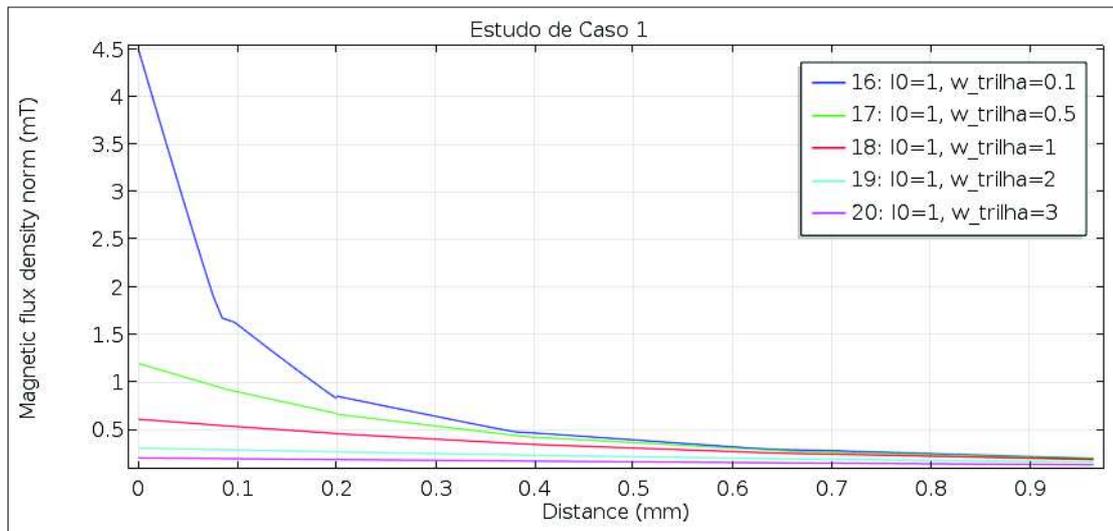
Na Figura 35 é possível visualizar a variação da magnitude da densidade de fluxo magnético no encapsulamento, o exemplo corresponde a uma corrente de 0,5A e a uma largura e espessura de trilha de 1mm e 0,035mm, respectivamente. Cabe ressaltar que a simulação foi realizada para todas as combinações mostradas na Tabela 9, além disso, também foi realizada a simulação térmica nestas mesmas condições. O APÊNDICE A apresenta os resultados tabulados das simulações para este estudo de caso, no qual, os dados em azul correspondem aos valores que estão dentro dos limites estabelecidos para os pontos de medição 1 e 2 e os valores em vermelho correspondem aos valores fora dos limites.

Entre os resultados obtidos na modelagem magnética, considerando apenas os valores que estão dentro dos limites estabelecidos para ponto de medição 2, pode-se destacar o menor valor da magnitude da densidade de fluxo magnético, correspondente a 0,22mT, obtido para a combinação de corrente de 0,5A com trilha de 1mm de largura e 0,105mm de espessura; e o maior valor, correspondente a 8,43mT, obtido para a combinação de corrente de 10A com trilha de 0,1mm de largura e 0,035 de espessura. Destaca-se ainda, o fato de que a magnitude ficou abaixo do limite em todas as situações simuladas para as duas correntes de menor intensidade, 0,005A e 0,05A .

Ainda, no que diz respeito a modelagem magnética, os resultados obtidos com este primeiro caso permitem algumas conclusões gerais, como por exemplo, é possível observar que quanto maior a corrente maior é a magnitude da densidade de fluxo magnético resultante, fato este já esperado, uma vez que, conforme enunciado pela lei de Biot-Savart, a corrente é diretamente proporcional ao campo. Também é possível observar que para uma mesma corrente, quanto maior a largura da trilha condutora, menor é a magnitude resultante para aquele ponto; de forma semelhante, isto também ocorre em relação a espessura da trilha. Este comportamento está associado ao fato de que quanto maior é a

área da trilha menor é a densidade de corrente e conseqüentemente mais fraco o campo magnético próximo a superfície da trilha, tal comportamento também é observado em Cubells et al. (2013) e segundo o *Application Note AN105 - Simulation of Magnetic Field* da Crocus (2015), este é um desafio a ser considerado neste tipo de aplicação. Isto fica evidente também no gráfico da Figura 36, gerado a partir dos dados obtidos com este estudo de caso. O gráfico mostra a magnitude da densidade de fluxo magnético (B) em função do afastamento para diferentes larguras de trilhas (0,1mm;0,5mm;1mm;2mm;3mm). A corrente utilizada foi de 1A e a espessura da trilha 0,035mm.

Figura 36 – B(mT) para diferentes larguras de trilha



Fonte: Elaborado pelo autor.

Com relação aos resultados da modelagem térmica, ainda para este primeiro caso, de modo geral, pode-se constatar que para uma mesma corrente, quanto menor a área de seção da trilha maior a temperatura resultante, concordando com Brooks e Adam (2015) que citam que a temperatura em uma trilha condutora aumenta proporcionalmente a potência e diminui proporcionalmente a área. Outro aspecto importante observado, é que a temperatura limite do ponto 1 (110°C) acaba não sendo um fator preponderante para este estudo de caso, uma vez a diferença de temperatura entre os dois pontos de medição é baixa e portanto o ponto 2, por possuir uma temperatura menor (85°C), acaba sendo predominante com relação a quais situações atendem aos limites especificados.

Entre os resultados específicos, destaca-se as simulações com corrente de 10A, onde em apenas uma situação (trilha com espessura de 0,105mm e largura de 3mm) a temperatura ficou abaixo do limite tolerável para o ponto 2 (85°C). Convém observar também que em algumas situações a temperatura nos pontos de medição praticamente não sofreu alterações, como por exemplo para as correntes abaixo de 0,05A onde a temperatura permaneceu próxima a de ambiente (25°C). Em determinadas situações observa-se uma criticidade maior, como por exemplo para a trilha de 1mm de largura e 0,070mm de

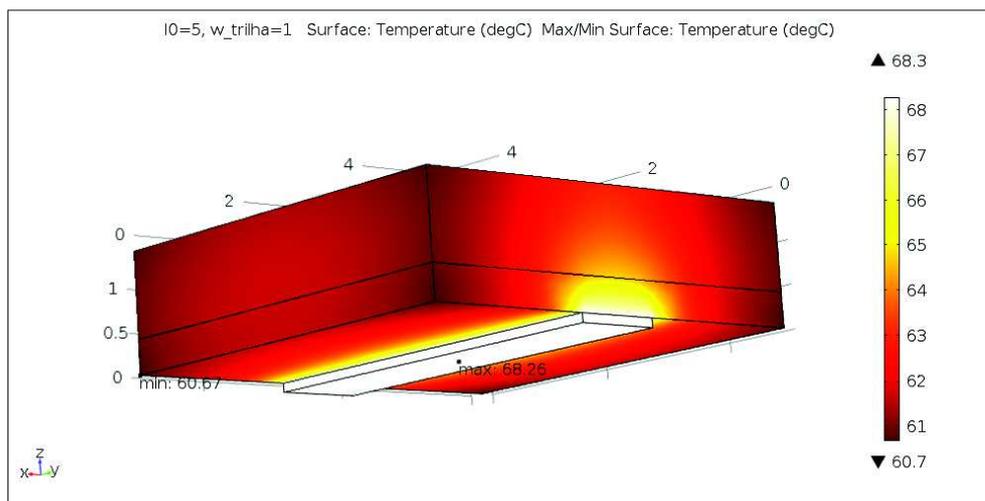
espessura, onde a temperatura resultante para o ponto 2 na corrente de 5A é de 85,11°C, no limite de corte portanto.

Para finalizar este estudo de caso, através de uma análise em ambas modelagens, magnética e térmica, é possível constatar que apenas cerca de 39% das combinações simuladas estão em conformidade com os limites estabelecidos para os pontos de medição, isto porque deve existir um compromisso entre os resultados obtidos, ou seja, nas situações onde a magnitude da densidade de fluxo magnético atende aos limites, é necessário que a temperatura correspondente também atenda.

4.2.2 Encapsulamento Simplificado - Estudo de Caso 2

O segundo caso desenvolvido teve como objetivo modelar o comportamento de uma trilha de cobre na parte inferior do encapsulamento. A Figura 37 mostra a simulação térmica realizada.

Figura 37 – Exemplo com a simulação térmica para o estudo de caso 2



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 37 pode-se visualizar a variação de temperatura nas superfícies do encapsulamento e também é possível visualizar o ponto de máxima (68,26°C) e de mínima (60,67°C) temperatura. Neste exemplo a situação ilustrada corresponde a uma corrente de 5A e a uma largura e espessura de trilha de 1mm e 0,105mm, respectivamente. De forma semelhante ao caso anterior, esta simulação foi realizada para todas as combinações previstas, tanto térmica quanto magnética, o APÊNDICE B apresenta os resultados tabulados para este caso.

A simulação térmica não apresentou grandes novidades com relação ao estudo de caso anterior e embora as temperaturas tenham ficado em geral abaixo dos valores registrados anteriormente, as situações nas quais a temperatura resultante ficou dentro dos limites permaneceram as mesmas.

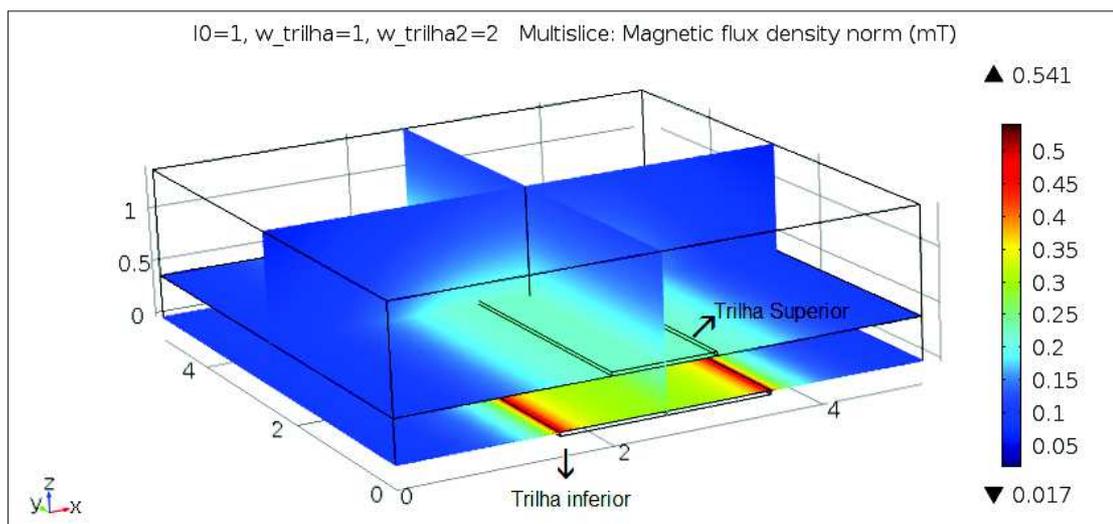
Com relação aos resultados obtidos na modelagem magnética, considerando os valores que estão dentro dos limites estabelecidos para ponto de medição 2, é possível constatar que o menor valor da magnitude da densidade de fluxo magnético corresponde a 0,24mT e foi obtido para a combinação de corrente de 1A com trilha de 1mm de largura e 0,105mm de espessura. Já o maior valor corresponde a 3,03mT, obtido para a combinação de corrente de 10A com trilha de 0,1mm de largura e 0,035mm de espessura. Neste estudo de caso, as correntes de 0,005A, 0,05A e 0,5A resultaram em um valor de magnitude abaixo do limite para todas as situações simuladas.

As considerações gerais feitas para o estudo de caso anterior, como por exemplo, a magnitude da densidade de fluxo magnético em relação a corrente, ou ainda, a temperatura em relação a área da trilha, também são válidas para este estudo de caso. A principal diferença entre este caso e o anterior, esta nos valores obtidos, principalmente com relação ao ponto 2 que neste caso encontra-se mais afastado (0,635mm) da trilha de cobre. Convém observar também que este afastamento interferiu principalmente nos resultados da simulação magnética, levando a uma redução nas combinações válidas (dentro dos limites tanto para a simulação magnética quanto térmica) para próximo a 29%.

4.2.3 Encapsulamento Simplificado - Estudo de Caso 3

Neste estudo de caso uma trilha de cobre foi anexada entre o substrato e o molde e outra na parte inferior do encapsulamento, combinando assim os dois casos anteriores conforme pode ser visto na Figura 38.

Figura 38 – Exemplo com a simulação magnética para o estudo de caso 3



Fonte: Elaborado pelo autor.

No exemplo da Figura 38 a trilha inferior possui 2mm de largura e a trilha superior possui 1mm, para ambos os casos a espessura é 0,035mm, a simulação exibida corresponde

a corrente de 1A na trilha inferior. Para este caso de estudo, o ponto 1 foi posicionado no centro sobre a superfície da trilha inferior, enquanto que o ponto 2 foi posicionado 0,2mm acima da trilha superior, no exemplo, os valores obtidos para os pontos 1 e 2 foram de 0,29mT e 0,19mT, respectivamente.

O objetivo deste estudo foi verificar se a presença da trilha no interior do encapsulamento interfere nos resultados obtidos com a trilha inferior, já que uma das intenções nas propostas de encapsulamento futuras é explorar a possibilidade de utilizar diferentes trilhas como forma de otimizar os resultados em relação ao campo e a temperatura para as diferentes faixas de corrente. Assim, visando atender este objetivo e facilitar a simulação, alguns parâmetros foram alterados em relação aos casos anteriores, conforme a tabela a seguir.

Tabela 10 – Parâmetros combinados utilizados no estudo de caso 3

Correntes (A)	Larguras trilha superior (mm)	Larguras trilha inferior (mm)	Espessuras de trilha (mm)
1	0,1	1	0,035 (1Oz)
5	0,5	2	
10	1	3	

Fonte: Elaborado pelo autor.

Após realizar as simulações para as combinações da Tabela 10, em comparação ao estudo de caso 2, os valores obtidos mostraram que a presença da trilha no interior do encapsulamento não interfere no campo magnético; este resultado já era esperado, uma vez que o material utilizado na trilha, o cobre, é considerado um material diamagnético. Quanto aos resultados obtidos com a simulação térmica, é possível observar que as temperaturas foram mais baixas do que as obtidas para o estudo de caso anterior; isto se deve ao fato de que a presença de uma segunda trilha no encapsulamento permite uma maior dissipação de calor. A listagem completa com os resultados é apresentada no APÊNDICE C.

4.2.4 Encapsulamento Simplificado - Estudo de Caso 4

Neste estudo de caso foi analisado o comportamento de um fio de ouro no interior do modelo simplificado, visando assim, simplificar o desenvolvimento das propostas seguintes, onde por exemplo, um fio de ouro anexado através do processo de *wire bonding* venha a ser utilizado como elemento de sensoriamento. Para isto, as trilhas de cobre foram removidas e diferente ao que ocorreu nos casos anteriores, onde o campo foi gerado sempre abaixo do ponto de medição 2, neste caso, o campo foi gerado acima deste ponto, com o fio posicionado a diferentes distâncias. A intenção neste caso foi analisar correntes menores do que 1A, já que o fio pode ser posicionado próximo ao topo do sensor (onde estaria localizado a MTJ) e tem menor capacidade de condução do que as trilhas.

Como não existe trilha neste estudo de caso, o ponto de medição 1 foi reposicionado para junto da superfície do fio de ouro e os parâmetros variáveis foram adaptados conforme apresentado na tabela a seguir.

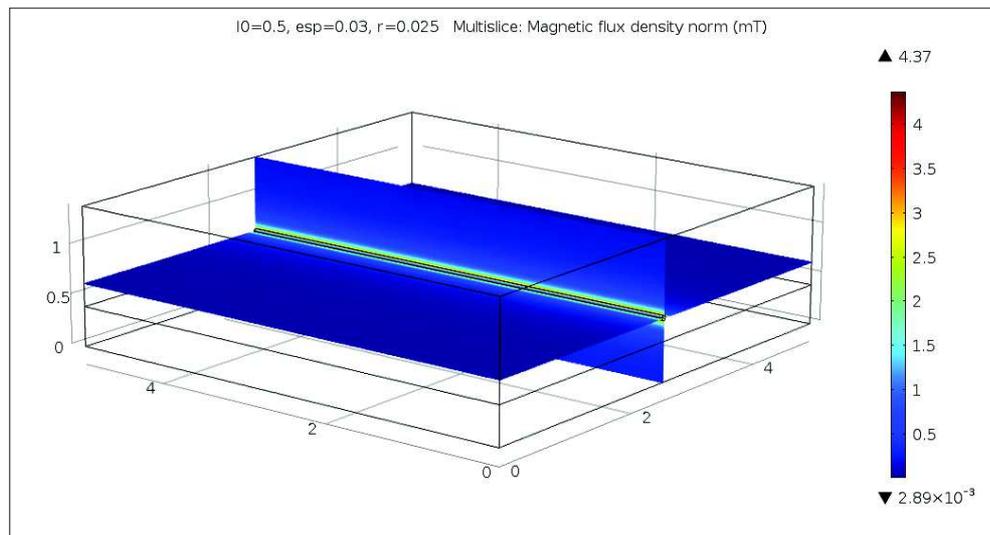
Tabela 11 – Parâmetros combinados utilizados no estudo de caso 4

Correntes (A)	Distâncias do fio em relação ao Ponto 2 (mm)	Raios do fio (mm)
0,005	0,03	0,0125
0,05	0,05	0,025
0,5	0,1	
1		

Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 39 mostra o resultado para a simulação magnética realizada. O exemplo correspondente a uma corrente de 0,5A sobre um fio de ouro de raio 0,025mm distante 0,03mm do ponto de medição 2. O valor resultante para a magnitude da densidade de fluxo magnético para o ponto 2, neste exemplo, foi de 3,34mT, em conformidade portanto, com a faixa dinâmica do sensor (0,2 a 220mT).

Figura 39 – Exemplo com a simulação magnética para o estudo de caso 4

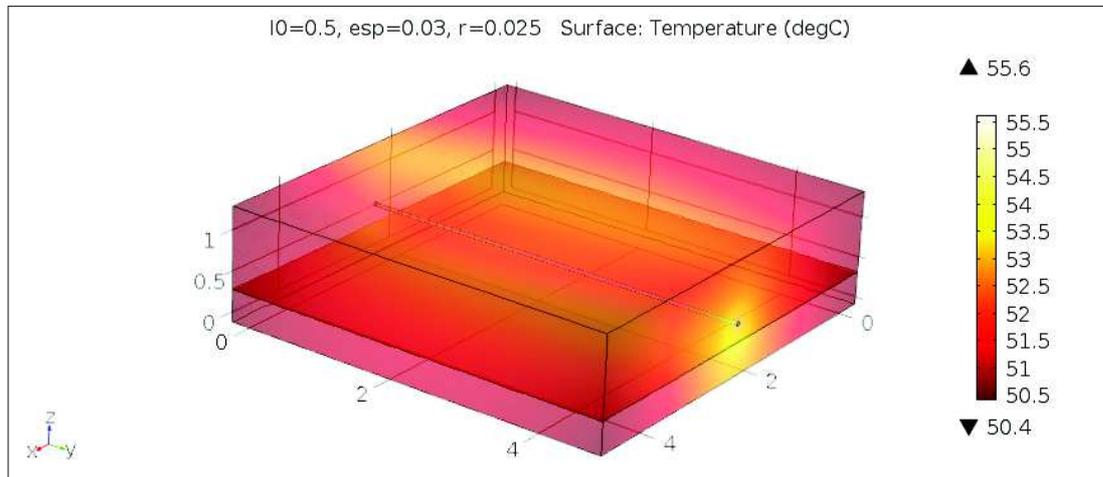


Fonte: Elaborado pelo autor.

O APÊNDICE D apresenta todos os resultados obtidos para este caso. Como destaque, é possível concluir que independente da variação dos demais parâmetros, para a menor corrente (0,005A) simulada, não é possível obter um valor para a magnitude da densidade de fluxo magnético que atenda ao mínimo necessário, por outro lado, convém observar que em comparação aos resultados obtidos anteriormente, somente neste caso foi possível alcançar o campo mínimo necessário com uma corrente de 0,05A. Com relação a modelagem térmica, pode-se constatar que a temperatura ficou acima de 85°C em todas as

situações com corrente de 0,5A e fio de raio 0,0125mm, assim como para todas as situações com corrente de 1A independente do raio do fio. A Figura 40 mostra o resultado para a simulação térmica realizada considerando os mesmos parâmetros da modelagem magnética descritos no exemplo anterior.

Figura 40 – Exemplo com a simulação térmica para o estudo de caso 4



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2.5 Encapsulamento Simplificado - Estudo de Caso 5

Neste último estudo de caso o objetivo foi analisar o comportamento térmico e magnético em relação a correntes de maior amplitude geradas a partir de um condutor externo ao encapsulamento, para isso, um fio de raio 2,5mm foi adicionado ao modelo. O afastamento deste fio de cobre em relação a base do encapsulamento, assim como a corrente foram os parâmetros variáveis neste estudo de caso, conforme a Tabela 12.

Tabela 12 – Parâmetros combinados utilizados no estudo de caso 5

Correntes (A)	Distâncias do fio em relação a base (mm)	Raios do Fio (mm)
10	0,1	2,5
100	0,3	
200	0,5	
	1	

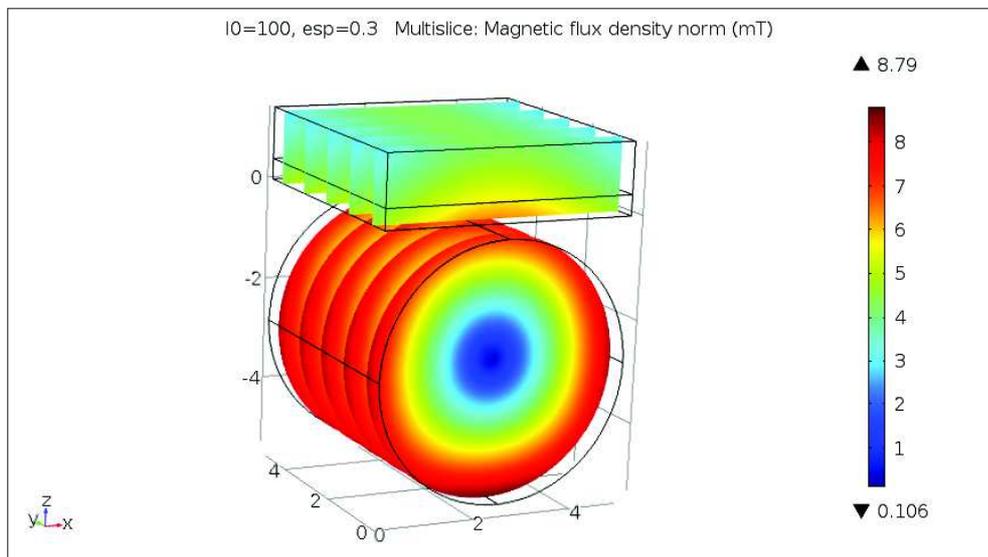
Fonte: Elaborado pelo autor.

Para este estudo de caso o ponto de medição 1 foi posicionado na superfície do fio do cobre, enquanto que o ponto 2 foi mantido na mesma posição (0,2mm acima do substrato). Especificamente neste caso, para a modelagem térmica, o fio não teve como fonte geradora de calor a corrente elétrica, ao invés disso, para esta simulação o fio foi considerado uma massa a 100°C constante, que equivale a temperatura máxima para

condutores em regime de sobrecarga com isolamento em PVC encontrados comercialmente; deste modo, na simulação o fio mantém uma temperatura fixa e não perde calor para o ambiente, uma vez que para uma aproximação mais realista, além da corrente, seria necessário considerar também os aspectos construtivos do fio, como por exemplo, isolamento e tipo de encordoamento, o que está fora do escopo deste trabalho, já que o objetivo é avaliar se a temperatura do fio interfere no encapsulamento.

A Figura 41 ilustra a distribuição da magnitude da densidade de fluxo magnético no fio e no encapsulamento. O exemplo correspondente a uma corrente de 100A sobre o fio de cobre de raio 2,5mm afastado 0,3mm da base do encapsulamento. O valor obtido para o ponto 1 e 2, neste exemplo, foi de 6,72mT e 5,22mT, respectivamente. A relação completa de resultados para este caso é apresentada no APÊNDICE E.

Figura 41 – Exemplo com a simulação magnética para o estudo de caso 5



Fonte: Elaborado pelo autor.

Conforme foi demonstrado é possível constatar que todos os resultados obtidos neste estudo de caso para a modelagem magnética ficaram dentro da faixa operacional de 0,2 a 220mT, enquanto que, na modelagem térmica, a temperatura ficou acima de 85°C no ponto 2 apenas no caso de menor afastamento (0,1mm). Portanto, embora a simulação tenha sido realizada com um modelo simplificado, conclui-se que é possível utilizar um condutor externo para o monitoramento de grandes correntes, desde que estabelecidos os limites de distância entre o condutor e o sensor.

4.2.6 Resumo da Segunda Etapa e Considerações Finais

No decorrer desta etapa foi realizada a modelagem térmica e magnética em diferentes estudos de caso, cada um associado a uma situação específica baseada em um modelo de encapsulamento simplificado. O objetivo, a partir da análise realizada, foi obter dados

que possam ser utilizados para simplificar o desenvolvimento dos encapsulamentos que serão propostos na etapa seguinte. De forma breve, os estudos de caso analisados foram os seguintes:

- estudo de caso 1 - no primeiro estudo de caso uma trilha de cobre foi posicionada entre o substrato e o molde, o objetivo foi simular a situação de uma trilha condutora no interior de um encapsulamento;
- estudo de caso 2 - neste estudo de caso uma trilha de cobre foi posicionada na superfície abaixo do substrato, o objetivo foi simular uma trilha condutora externa ao encapsulamento;
- estudo de caso 3 - neste estudo de caso a simulação foi realizada juntando ambos os casos anteriores, ou seja, com uma trilha de cobre entre o substrato e o molde e outra embaixo do encapsulamento, o objetivo deste estudo foi avaliar se a presença de ambas as trilhas influenciaria nos resultados;
- estudo de caso 4 - neste estudo de caso um fio de ouro foi posicionado no interior do encapsulamento, o objetivo foi analisar o comportamento decorrente de pequenas correntes circulando por um fio similar ao utilizado em *wire bonding*;
- estudo de caso 5 - no último estudo de caso, um fio de cobre foi posicionado externamente em diferentes distâncias do encapsulamento, o objetivo foi analisar o comportamento em função de correntes de maior intensidade circulando por um condutor externo.

Para a análise dos diferentes casos, dois pontos de medição foram considerados, um deles posicionado centralizado próximo a superfície do elemento condutor e o outro posicionado a 0,2mm de altura do substrato, simulando assim, o ponto de detecção do sensor MTJ. Os limites estipulados para estes pontos foram baseados nas propriedades dos materiais e do sensor MTJ, sendo que para a modelagem térmica o limite máximo de temperatura definido para o ponto 1 (casos 1, 2 e 3) foi de 110°C e para o ponto 2 o limite máximo definido foi de 85°C. Para a modelagem magnética não foi estipulado limite para o ponto 1, no entanto, para o ponto 2 foram estabelecidos limites de 0,2mT de mínimo e de 220mT de máximo.

Visando estabelecer uma correspondência entre as simulações térmica e magnética, uma vez que um campo gerado por uma determinada corrente deve ser condizente com a capacidade de condução do meio, para todos os estudos de caso, exceto o último, os valores de corrente adotados na simulação de campo magnético foram os mesmos utilizados na simulação de temperatura, portanto, como critério de análise, os limites estabelecidos precisam ser satisfeitos simultaneamente para cada estudo de caso. A Tabela 13 apresenta

um resumo com os menores valores de campo magnético encontrados e suas temperaturas correspondentes para cada estudo de caso. Foram considerados apenas os resultados cujos valores ficaram dentro dos limites estabelecidos para ambas simulações. O traço (-) no campo significa que o dado não se aplica aquele estudo de caso.

Tabela 13 – Valores mínimos obtidos nas simulações em cada estudo de caso

Estudo de Caso	Corrente (A)	Campo - B (mT)		Temperatura (°C)		Trilha (mm)		Fio (mm)	
		Ponto 1	Ponto 2	Ponto 1	Ponto 2	larg.	esp.	raio	dist.
1	0,5	0,29	0,22	25,39	25,38	1	0,105	-	-
2	1	0,57	0,24	26,69	26,56	1	0,105	-	-
3	1	0,60	0,25	27,53	27,32	1	0,035	-	-
4	0,05	0,41	0,20	25,30	25,29	-	-	0,025	0,05
5	10	0,48	0,38	100,00	59,37	-	-	2,50	1

Fonte: Elaborado pelo autor.

A Tabela 14 apresenta um resumo com os valores máximos para cada estudo de caso com a magnitude da densidade de fluxo magnético e as temperaturas correspondentes, considerando os limites mencionados.

Tabela 14 – Valores máximos obtidos nas simulações em cada estudo de caso

Estudo de Caso	Corrente (A)	Campo - B (mT)		Temperatura (°C)		Trilha (mm)		Fio (mm)	
		Ponto 1	Ponto 2	Ponto 1	Ponto 2	larg.	esp.	raio	dist.
1	5	2,92	2,18	65,32	64,92	1	0,105	-	-
2	5	2,91	1,25	90,14	84,94	1	0,070	-	-
3	5	2,98	1,24	89,96	84,47	1	0,035	-	-
4	0,5	4,31	0,97	55,91	54,99	-	-	0,025	0,1
5	200	13,43	10,43	100,00	77,32	-	-	2,50	0,3

Fonte: Elaborado pelo autor.

Como resultado foi possível constatar que os menores valores de corrente, cujo campo poderia ser detectado pelo sensor MTJ, foram obtidos no estudo de caso 4, onde o fio de ouro passa muito próximo ao sensor, por outro lado, os maiores valores de corrente, considerando o condutor como parte do encapsulamento, foram observados para os estudos de caso 1 e 2. O estudo de caso 3 mostrou que a influência da trilha de cobre interna é desprezível em relação ao estudo de caso 2 para o campo, sendo mais perceptível os efeitos na modelagem térmica. O estudo de caso 5, demonstrou que através do uso de um condutor externo correntes de maior intensidade podem ser detectadas, desde que a relação entre o afastamento deste condutor e o calor gerado pelo mesmo seja conhecida e respeitada.

Como conclusão desta etapa, pode-se considerar que as simulações com o modelo simplificado foram realizadas conforme o planejado, sendo que o conhecimento adquirido e os resultados obtidos serão úteis na próxima etapa, uma vez que nortearão o desenvolvimento dos modelos de encapsulamentos seguintes.

4.3 Modelagem de Diferentes Propostas de Encapsulamento

Nas seções a seguir serão apresentadas e analisadas diferentes propostas de encapsulamento e assim como ocorreu na etapa anterior, com o modelo de encapsulamento simplificado, a análise será realizada em função dos resultados obtidos nas simulações térmica e magnética dos modelos propostos. O objetivo é obter dados que possibilitem posteriormente realizar a comparação entre estas propostas.

Nesta etapa, os desenhos dos modelos foram projetados em um software à parte do ambiente de simulação COMSOL[®], no caso o CAD 3D SolidWorks[®] que é um software amplamente utilizado para este fim. No entanto, cabe ressaltar que ao importar os desenhos de um software para outro, a inclusão de variáveis nos dados dimensionais do projeto não é possível, portanto, os dados obtidos anteriormente com o encapsulamento simplificado tiveram crucial importância na medida que serviram como referência agilizando o desenvolvimento das propostas apresentadas a seguir.

Os modelos foram projetados como parte integrante de um sistema encapsulado contendo um CI microprocessado. Assim, além do sensor MTJ para a detecção de campos magnéticos o dispositivo completo integraria outras funções, de forma similar a outros dispositivos encontrados do mercado. Este fato, no entanto, não impede que os resultados obtidos com as simulações sejam considerados válidos também para o caso de uma aplicação individual contendo apenas o sensor MTJ por exemplo.

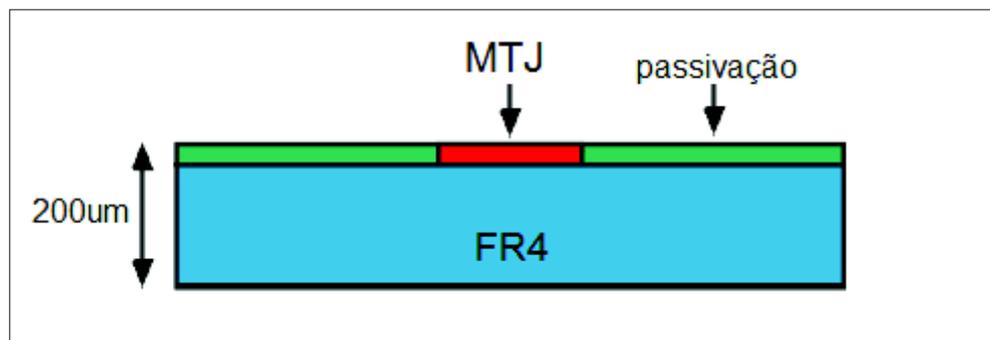
Convém mencionar também que não foram adicionados novos materiais nos encapsulamentos propostos, desta forma elementos como adesivos do tipo *die attach* e soldas não foram considerados, isto porque estes elementos geralmente possuem dimensões relativamente pequenas e de pouco impacto em comparação ao restante dos materiais presentes no encapsulamento, além disso, a malha gerada pelo MEF pode se tornar muito complexa devido as dimensões reduzidas destes componentes, contribuindo para o aumento no tempo de processamento. A tabela com as propriedades dos materiais utilizados nas simulações foi apresentada na seção 4.1.2, os valores referentes ao coeficiente de convecção térmica (h) e da temperatura ambiente também permanecem os mesmos da etapa anterior, $10\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$ e 25°C , respectivamente.

Diferente da etapa anterior, nesta etapa, a modelagem magnética foi realizada também para o campo magnético decorrente de correntes alternadas (AC), 60Hz, visando deste modo uma possível futura aplicação do dispositivo tanto para a detecção de correntes

continuas quanto alternadas, utilizadas na rede de distribuição.

Da mesma forma como ocorreu na simulações com o encapsulamento simplificado, nesta etapa também foram adicionados pontos de medição para possibilitar a análise. O ponto de medição principal, comum em todas as propostas, foi colocado centralizado no topo do chip do sensor MTJ, que é onde esta localizada a célula do mesmo. Os limites do ponto permaneceram os mesmos da etapa anterior, já que foram estabelecidos em função das características operacionais do sensor, sendo 85°C o limite máximo de temperatura e $0,2\text{mT}$ a 220mT a faixa operacional para o campo magnético. A temperatura máxima também foi monitorada para que não ultrapassasse 110°C em qualquer local. A Figura 42 mostra o chip do sensor com a célula MTJ.

Figura 42 – Chip com sensor MTJ utilizado



Fonte: Elaborado pelo autor.

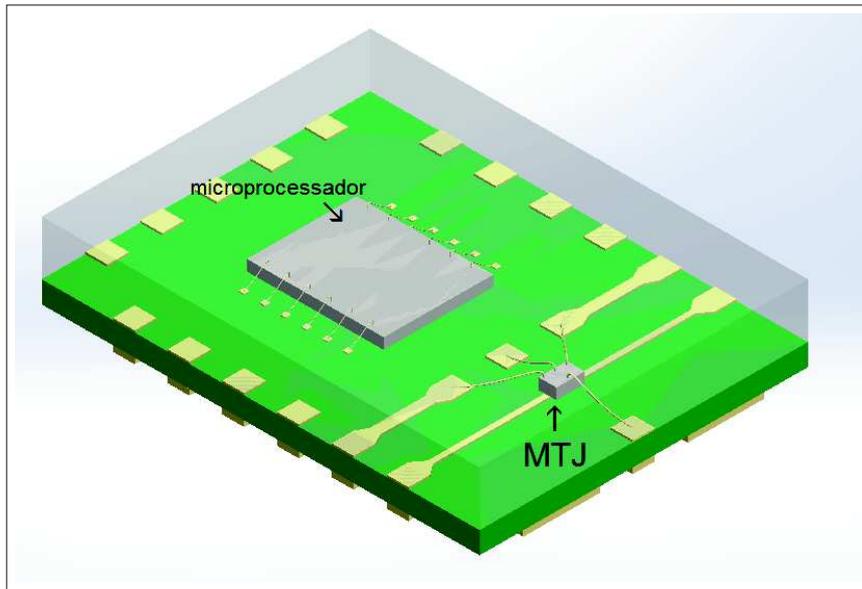
O material adotado para o sensor MTJ nas simulações foi o FR4, já que este constitui a maior parte do chip, embora se saiba que no topo do chip onde esta a célula MTJ exista uma lâmina de silício, proporcionalmente muito fina e pequena, dopada de materiais diversos. O chip com o sensor MTJ possui as dimensões de $521\mu\text{m}$ de comprimento, $327\mu\text{m}$ de largura e $200\mu\text{m}$ de altura.

4.3.1 Proposta de Encapsulamento 1

Conforme mencionado anteriormente, os modelos apresentados nesta etapa foram projetados como parte integrante de um sistema encapsulado, assim, nesta primeira proposta, um encapsulamento do tipo COB foi projetado contendo o chip do sensor MTJ e outro chip, representado por exemplo um microprocessador. O interesse aqui não é analisar o funcionamento ou simular o comportamento deste sistema, mas sim demonstrar como a estrutura projetada para o sensor poderia ser adaptada e aproveitada também em uma plataforma múltipla.

O dispositivo completo possui um total de 20 *pads* e suas dimensões são de 8mm, 6mm, 1,505mm, sendo respectivamente, comprimento, largura e altura. A Figura 43 exhibe o dispositivo proposto.

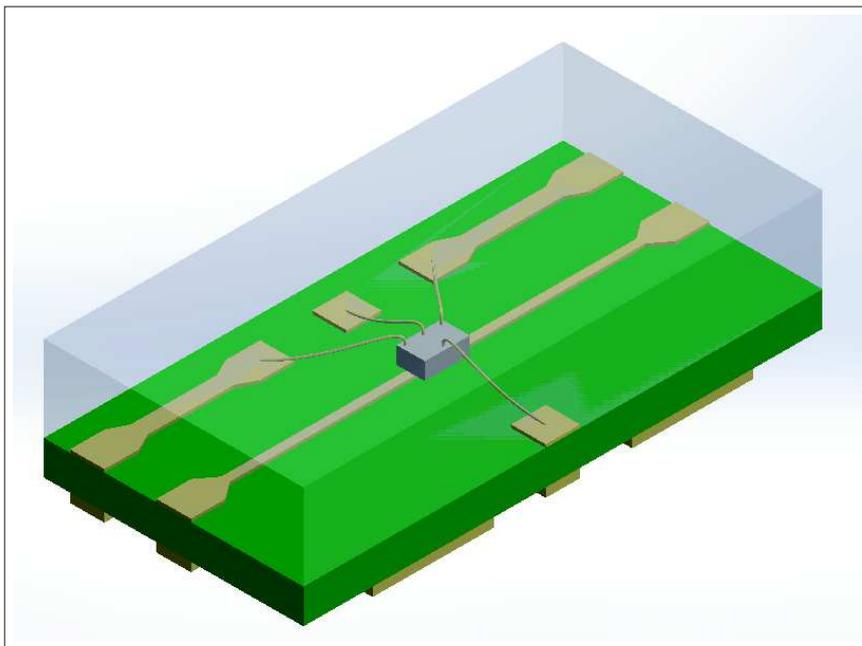
Figura 43 – Vista isométrica com o encapsulamento projetado para a proposta 1



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 44 exibe a parte do encapsulamento utilizada nas simulações, onde ao centro é possível ver o chip com o sensor MTJ e as conexões com *wire bonding*. As dimensões da peça analisada são de 3mm, 6mm e 1,505mm, sendo respectivamente, comprimento, largura e altura.

Figura 44 – Vista isométrica com a parte do encapsulamento simulada na proposta 1

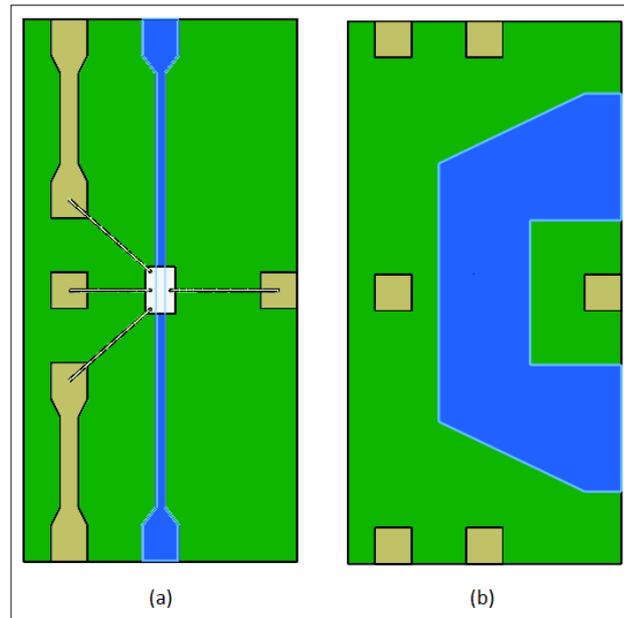


Fonte: Elaborado pelo autor.

Para esta primeira proposta o encapsulamento foi projetado utilizando duas trilhas de cobre de diferentes larguras e espessuras, posicionadas abaixo do sensor MTJ. Estas

trilhas foram sobrepostas e separadas pelo substrato de FR4 utilizado na base, cuja a espessura é de 0,4mm. A trilha acima do substrato (superior), vista em destaque na Figura 45 (a), possui a espessura de 0,035mm (1 Oz) e largura na faixa central de 0,10mm, enquanto que a trilha de cobre abaixo do substrato (inferior), em destaque na Figura 45 (b), possui 0,105mm (3 Oz) de espessura e 1mm de largura.

Figura 45 – Proposta 1, vista das trilhas superior (a) e inferior (b)



Fonte: Elaborado pelo autor.

A escolha destas características (largura e espessura das trilhas) levou em consideração os resultados obtidos com os modelos simulados nos casos de estudo 1 e 2 da etapa anterior, no qual foi possível constatar que pode-se utilizar duas trilhas com diferentes características para maximizar a faixa operacional do dispositivo projetado em função das correntes detectadas. A tabela a seguir exhibe as correntes simuladas para cada trilha nesta proposta.

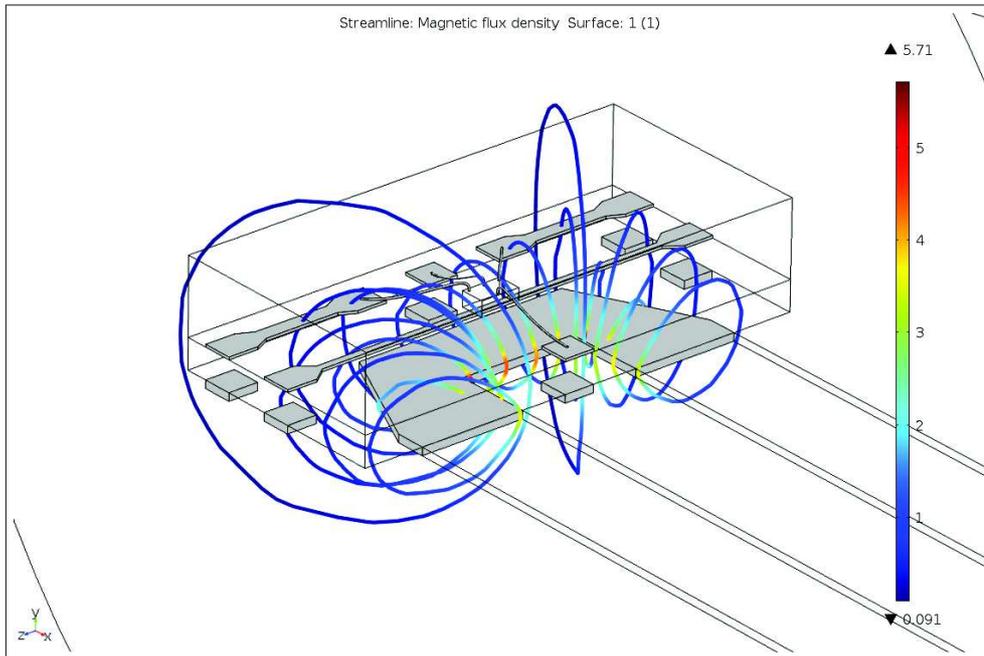
Tabela 15 – Correntes simuladas na proposta 1

Trilha	Largura	Espessura	Correntes
Superior	0,10 mm	0,035 mm	0,05A 0,1A 0,5A 1A 2A
Inferior	1 mm	0,105 mm	0,5A 1A 2A 3A 5A 10A

Fonte: Elaborado pelo autor.

As simulações magnéticas foram realizadas para correntes DC e AC (60Hz), sendo que no caso desta última os valores correspondem ao valor de pico da corrente (V_P). Para a análise térmica, apenas a corrente DC foi considerada. A Figura 46 mostra as linhas de fluxo magnético obtidas através da simulação com a trilha inferior do encapsulamento para uma corrente de 5A DC.

Figura 46 – Simulação do campo para trilha inferior, proposta 1



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os valores obtidos com as simulações (magnética e térmica) da trilha inferior para o ponto de medição principal estão compilados na Tabela 16.

Tabela 16 – Resultados das simulações para a trilha de corrente inferior da proposta 1

Corrente (A)	B (DC) (mT)	B (AC) (mT)	Temp. (°C)
0,5	0,121	0,121	25,41
1	0,241	0,241	26,63
2	0,483	0,483	31,53
3	0,724	0,724	39,70
5	1,207	1,207	66,05
10	2,415	2,415	189,47

Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Tabela 16 os valores em azul representam os valores que atendem aos critérios de classificação do dispositivo (magnitude da densidade de fluxo magnético entre 0,2mT a 220mT e temperatura até 85°C), enquanto que os valores em vermelho representam os valores fora dos mesmos. Considerando estas mesmas características de trilha, os resultados mostram que a faixa de corrente que atende a estes critérios segue sendo a mesma da simulada no estudo de caso 2, com o encapsulamento simplificado. Cabe citar ainda, que embora estes resultados já fossem esperados, as correntes de 0,5A e 10A foram incluídas novamente nas simulações como forma de verificar se haveria alguma mudança em relação aos resultados.

Também, com relação aos resultados mostrados na Tabela 16, é possível verificar que o campo para a corrente DC foi semelhante ao obtido para a corrente AC, embora em DC deva ser considerado o valor médio da corrente enquanto que para AC deva ser considerado o valor de pico. A temperatura também ficou dentro do esperado e embora não conste na tabela, a temperatura máxima para a corrente de 5A, que foi a mais alta dentro dos critérios estabelecidos, ficou em 69,09°C, abaixo portanto, da Tg do FR4 (110°C).

As simulações também foram realizadas para a trilha superior do encapsulamento, com os valores de corrente já citados na Tabela 15, os resultados são mostrados a seguir.

Tabela 17 – Resultados das simulações para a trilha de corrente superior da proposta 1

Corrente (A)	B (DC) (mT)	B (AC) (mT)	Temp. (°C)
0,05	0,045	0,045	25,15
0,1	0,089	0,089	25,59
0,5	0,446	0,446	39,63
1	0,892	0,892	83,87
2	1,784	1,784	260,88

Fonte: Elaborado pelo autor.

Conforme pode ser visto na Tabela 17 os resultados ficaram próximos aos obtidos com o estudo de caso 1 do encapsulamento simplificado. A faixa de corrente entre 0,5A e 1A ficou dentro dos critérios estabelecidos, enquanto que as correntes abaixo de 0,5A resultaram na magnitude da densidade de fluxo magnético inferior a 0,2mT e no caso da corrente de 2A a temperatura excedeu aos 85°C permitidos para o sensor. A temperatura máxima obtida nas simulações, na proximidade das trilhas, foi de 86,91°C para uma corrente de 1A, abaixo portanto do limite tolerável para o FR4 de 110°C.

Ao analisar o conjunto de simulações realizadas para ambas trilhas do encapsulamento proposto (inferior e superior), pode-se constatar que o dispositivo projetado estaria apto a operar em uma faixa de corrente de 0,5A a 5A, no entanto, embora não tenha sido simulado neste momento, as correntes de maior intensidade poderiam ser detectadas através de condutores externos ao dispositivo, conforme foi evidenciado na etapa anterior. Assim, a questão principal recai sobre as correntes de menor intensidade, abaixo de 0,5A, que neste caso não poderiam ser detectadas.

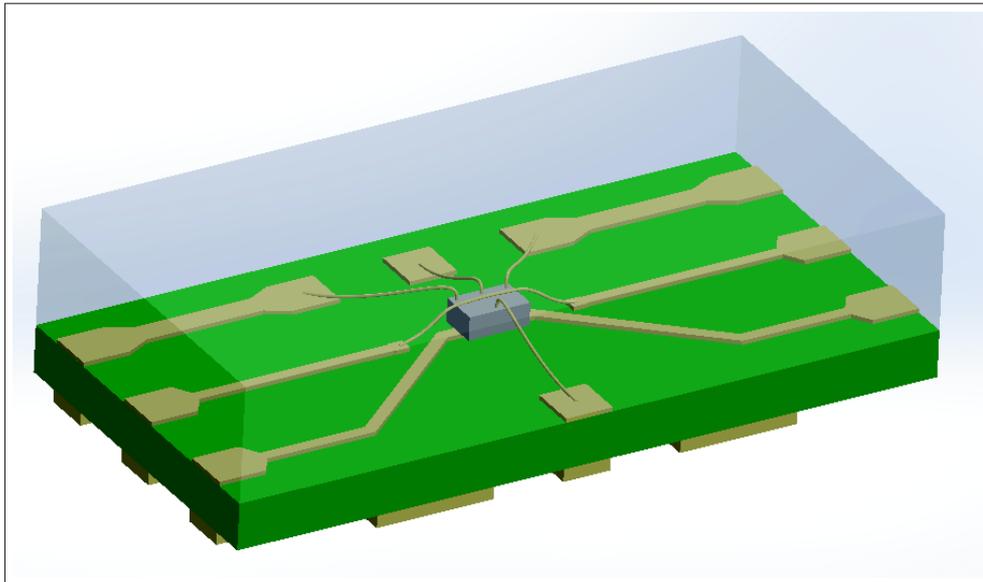
4.3.2 Proposta de Encapsulamento 2

Nesta proposta o projeto anterior foi modificado com o objetivo de possibilitar a detecção das correntes com menor intensidade, para isso, com base nos estudos realizados na etapa anterior, um fio de ouro foi introduzido próximo ao topo do sensor onde está localizada a célula MTJ, configurando assim uma via alternativa de condução. As trilhas

de cobre, superior e inferior do substrato, permanecem compondo o projeto com as mesmas características de largura e espessura, sendo que a principal mudança neste âmbito ficou por conta do traçado da trilha superior, que precisou ser redesenhada devido a necessidade de alinhamento dos *pads* para o posicionamento do fio de ouro. Cabe citar que apenas a parte do encapsulamento com o sensor MTJ foi modificada, portanto, a visão geral do sistema permanece sendo um COB, semelhante ao apresentado na proposta anterior (Figura 43).

A Figura 47 exibe a parte do encapsulamento modificada, na qual é possível ver o fio de ouro cruzando por cima do sensor MTJ. As dimensões externas da parte simulada, bem como o ponto de medição e os materiais utilizados, com exceção do fio de ouro, permanecem os mesmos da proposta anterior.

Figura 47 – Vista isométrica com a parte do encapsulamento simulada na proposta 2



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Tabela 18, mostra os valores de corrente que foram simulados no fio e em cada uma das trilhas:

Tabela 18 – Correntes simuladas na proposta 2

	Largura	Espessura	Diamêtro	Correntes
Trilha Superior	0,10mm	0,035mm	-	0,05A 0,1A 0,5A 1A 2A
Trilha Inferior	1mm	0,105mm	-	0,5A 1A 2A 3A 5A 10A
Fio de Ouro	-	-	0,025mm	0,05A 0,1A 0,5A

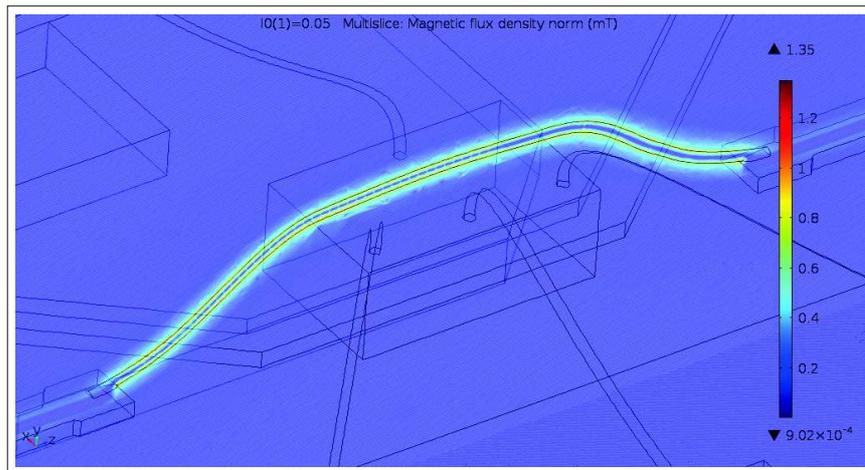
Fonte: Elaborado pelo autor.

No projeto, a distância de afastamento do fio de ouro do topo do sensor é de 0,03mm. A ideia foi aproximar o condutor do sensor MTJ já que o propósito neste caso

é detectar o campo magnético gerado pelas correntes de menor intensidade. Além disso, a escolha desta distância levou em consideração também os resultados observados com o encapsulamento simplificado e as especificações dos equipamentos comerciais de *wire bonding* conforme Shinkawa (2016) e Palomar (2016).

A Figura 48 exibe a simulação do campo magnético gerado pela corrente de 0,05A DC passando pelo fio de ouro sobre o sensor MTJ.

Figura 48 – Detalhe do campo magnético sobre o fio de ouro



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os resultados das simulações (magnética e térmica) realizadas para as correntes no fio de ouro são apresentados na tabela a seguir.

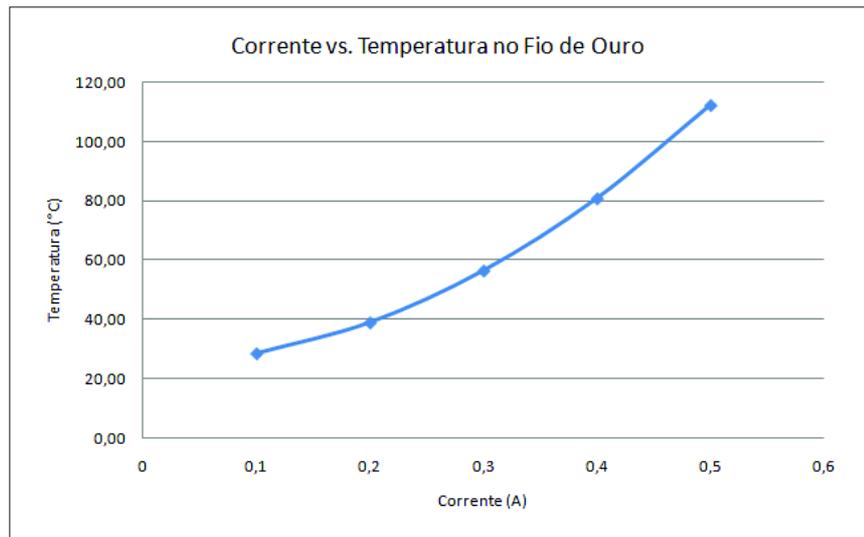
Tabela 19 – Resultados das simulações para o fio de ouro da proposta 2

Corrente (A)	B (DC) (mT)	B (AC) (mT)	Temp (°C)
0,05	0,21	0,21	25,87
0,1	0,421	0,421	28,47
0,5	2,104	2,104	112,32

Fonte: Elaborado pelo autor.

Conforme é possível verificar as correntes de 0,05A e 0,1A ficaram dentro dos valores válidos, tanto para o campo magnético, quanto para a temperatura, sendo que apenas no caso da corrente de 0,5A o resultado ficou acima da temperatura limite de 85°C. Deste modo, a fim de definir o valor máximo de corrente em função da temperatura resultante, uma nova simulação térmica foi realizada para a faixa de 0,1A até 0,5A. Nesta simulação os resultados mostraram que até 0,4A é seguro utilizar o fio, correspondendo a temperatura de 80,79°C no topo do sensor e a 83,59°C a máxima registrada próximo ao centro do fio. O gráfico da Figura 49 mostra a curva corrente vs. temperatura para a simulação realizada.

Figura 49 – Corrente vs. temperatura no fio de ouro



Fonte: Elaborado pelo autor.

Através das simulações realizadas com o fio de ouro pode-se concluir que a sua utilização cobriria uma faixa de 0,05A a 0,4A, sendo que para valores de corrente superiores a este seria necessário utilizar outra configuração, ou em termos práticos selecionar outros terminais do dispositivo.

O passo seguinte foi realizar as simulações para a trilha de cobre superior de acordo com os valores de corrente apresentados anteriormente na Tabela 18. Os resultados destas simulações são apresentados na tabela a seguir.

Tabela 20 – Resultados das simulações para a trilha de cobre superior da proposta 2

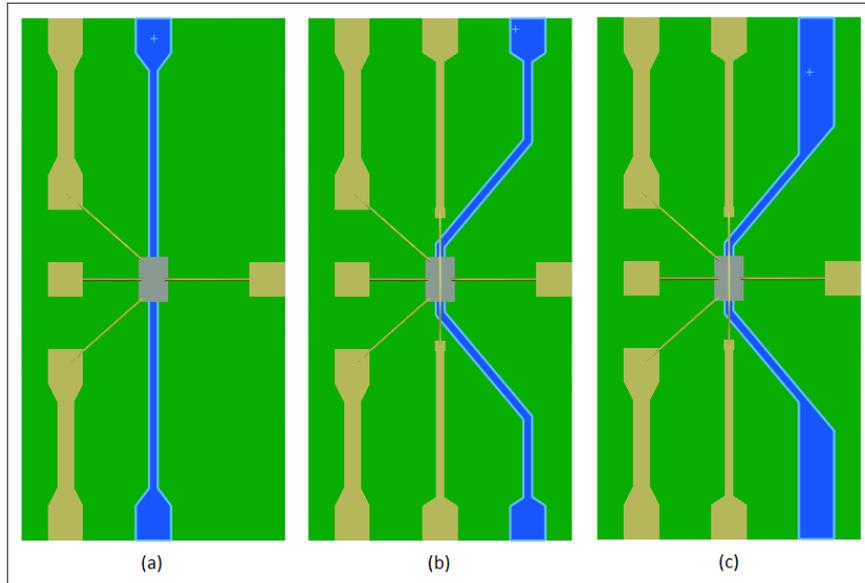
Corrente (A)	B (DC) (mT)	B (AC) (mT)	Temp (°C)
0,05	0,045	0,045	25,17
0,1	0,090	0,090	25,68
0,5	0,448	0,448	41,98
1	0,896	0,896	93,04
2	1,791	1,791	297,16

Fonte: Elaborado pelo autor.

Através da Tabela 20 é possível constatar que somente para a corrente de 0,5A os resultados ficaram dentro do estabelecido, sendo que para as correntes menores, a magnitude da densidade de fluxo ficou abaixo de 0,2mT, enquanto que para as correntes maiores, a temperatura ficou acima dos 85°C. O que chama atenção nestes resultados é o fato da corrente de 1A ter ficado acima do limite na simulação de temperatura, diferente do que ocorreu nesta mesma situação para o encapsulamento simplificado e para a proposta anterior. Tal mudança está relacionada a alteração no traçado da trilha. A Figura 50

mostra em destaque a trilha superior, onde (a) corresponde a proposta 1, (b) a proposta 2 e (c) a alteração efetuada na dimensão dos *pads*.

Figura 50 – Comparação da trilha superior entre as propostas.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Embora as dimensões dos *pads*, a espessura e a largura da trilha tenham sido mantidas as mesmas entre as duas propostas iniciais, ao se modificar o traçado da trilha na segunda proposta ocorreu um aumento no comprimento total da mesma, resultando assim em uma maior temperatura. Esta situação é também observada por Brooks e Adam (2015), onde segundo os autores o comprimento da trilha e as dimensões dos *pads* podem impactar em mudanças de temperatura que não são facilmente previsíveis. Como solução, o projeto foi modificado, sendo que a área referente aos *pads* foi redimensionada para aumentar a dissipação térmica, conforme visto na Figura 50 item (c). A Tabela 21 a seguir mostra os resultados das simulações após a revisão do projeto.

Tabela 21 – Resultados das simulações para a trilha superior após revisão do projeto

Corrente (A)	B (DC) (mT)	B (AC) (mT)	Temp (°C)
0,05	0,044	0,044	25,13
0,1	0,087	0,087	25,50
0,5	0,436	0,436	37,47
1	0,871	0,871	74,85
2	1,743	1,743	224,29

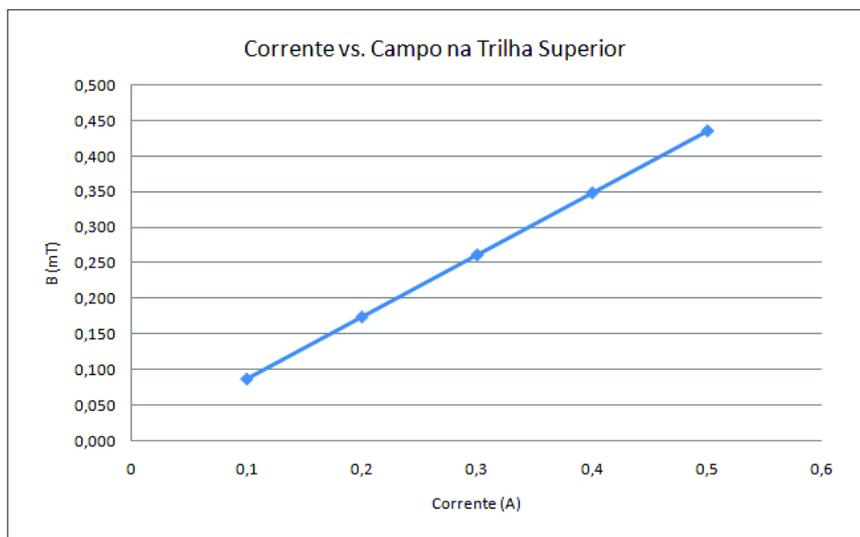
Fonte: Elaborado pelo autor.

Conforme é possível verificar na Tabela 21 com o redimensionamento dos *pads* a temperatura baixou no ponto de medição, permitindo novamente que corrente de 1A ficasse

dentro dos limites operacionais. A máxima registrada para este caso ficou em $77,48^{\circ}\text{C}$, próximo ao centro da trilha.

Outra questão pendente até o momento, ainda com relação a trilha superior, diz respeito as correntes acima de $0,4\text{A}$, já que esta foi a corrente máxima definida em função da temperatura para o fio de ouro. Portanto, como não foi definida qual a corrente mínima coberta pela trilha superior, uma nova simulação, neste caso magnética, com os valores de corrente entre $0,1\text{A}$ e $0,5\text{A}$ DC precisou ser realizada. O gráfico da Figura 51 mostra os resultados desta simulação, onde é possível constatar que os valores da magnitude da densidade de fluxo magnético para as correntes a partir de $0,3\text{A}$ ficaram acima de $0,2\text{mT}$.

Figura 51 – Corrente vs. campo na trilha superior.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para finalizar a análise desta proposta foram realizadas as simulações da trilha inferior. Os resultados estão compilados na Tabela 22.

Tabela 22 – Resultados das simulações para a trilha de corrente inferior da proposta 2

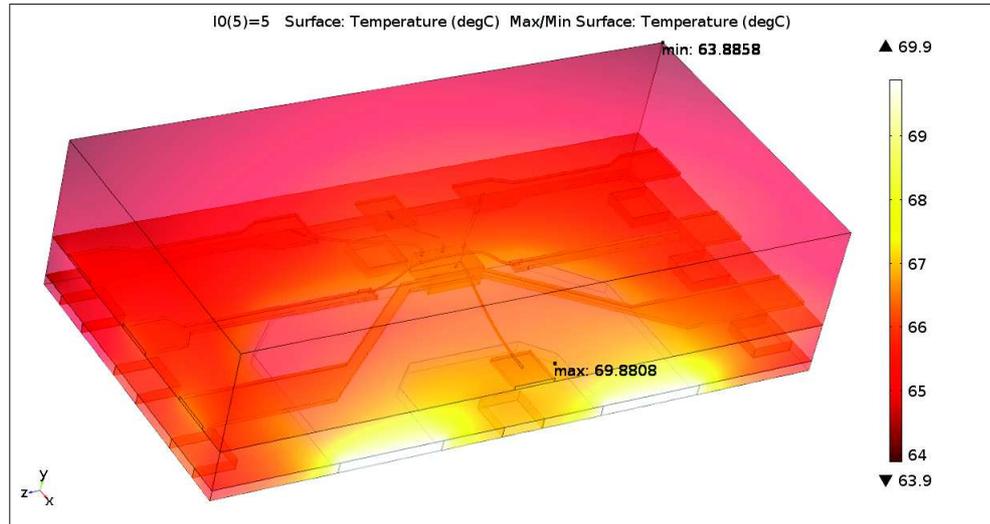
Corrente (A)	B (DC) (mT)	B (AC) (mT)	Temp ($^{\circ}\text{C}$)
0,5	0,118	0,118	25,42
1	0,236	0,236	26,67
2	0,473	0,473	31,67
3	0,709	0,709	40,01
5	1,182	1,182	66,68
10	2,365	2,365	191,71

Fonte: Elaborado pelo autor.

Uma vez que as características da trilha inferior foram mantidas as mesmas da proposta anterior os resultados também foram semelhantes, permanecendo a faixa de

corrente entre 1A e 10A dentro dos limites especificados (magnitude da densidade de fluxo magnético entre 0,2mT a 220mT e temperatura até 85°C). A temperatura máxima registrada para a corrente de 5A também ficou abaixo dos 110°C próximo a região da trilha, conforme pode ser visto na Figura 52.

Figura 52 – Simulação térmica da proposta 2, calor gerado na trilha inferior.



Fonte: Elaborado pelo autor.

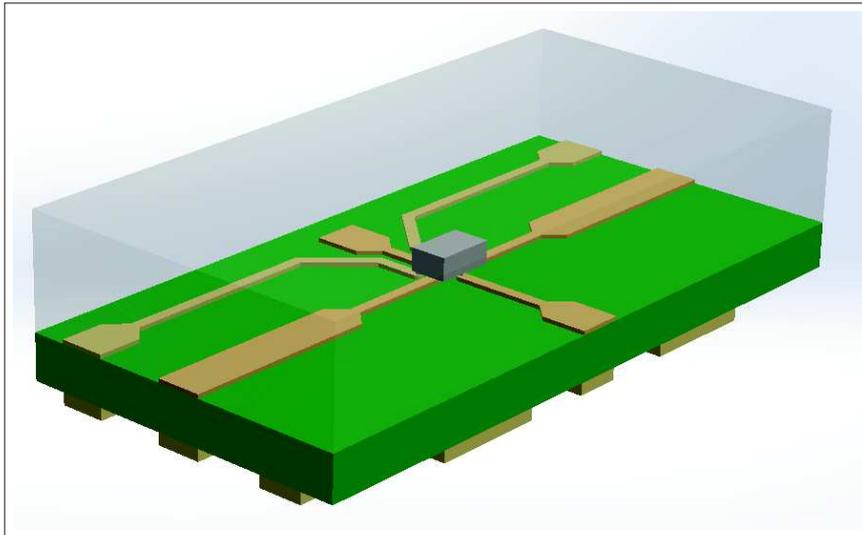
Analisando as simulações realizadas nesta proposta, é possível concluir que o dispositivo projetado estaria apto a operar em uma faixa de corrente de 0,05A a 5A através de diferentes combinações de *pads*. Para valores de corrente superiores, seria necessário utilizar condutores externos próximos ao encapsulamento.

4.3.3 Proposta de Encapsulamento 3

Nesta proposta o chip com o sensor MTJ foi rotacionado verticalmente 180° (invertido) e posicionado sobre o substrato. Na prática, este processo é conhecido como *flip chip* (ver seção 2.4.4.3). O propósito neste caso, além de dispensar a utilização de fios, é aproximar o ponto de detecção do sensor da trilha condutora.

Assim como ocorreu na proposta anterior, as modificações do projeto foram realizadas apenas para a parte do encapsulamento destinada ao sensor de campo magnético, portanto a visão geral do projeto permanece sendo um encapsulamento do tipo COB como o demonstrado na proposta 1 (Figura 43). A maior parte dos componentes segue sem alterações em relação a proposta 1, sendo que a principal mudança, além da rotação do sensor já mencionada, novamente foi no traçado e nas dimensões dos *pads* da trilha superior. Também foram inseridas trilhas auxiliares na face superior do substrato, com o objetivo de substituir as conexões que antes eram feitas através de fios, entre o sensor e os *pads* do encapsulamento. A Figura 53 exhibe o projeto proposto.

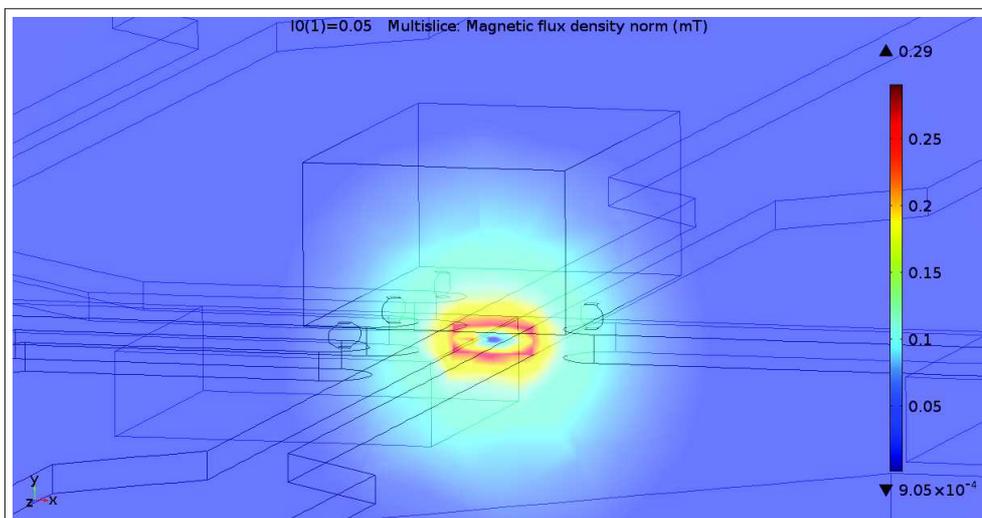
Figura 53 – Vista isométrica com a parte do encapsulamento simulada na proposta 3.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para esta proposta duas montagens foram realizadas. Na primeira delas, a distância entre a face de detecção do sensor e a trilha condutora é de 0,03mm, na prática este valor é determinado sobretudo pelo diâmetro das esferas utilizadas no processo de *flip chip*. Neste caso, as esferas seriam implementadas através do processo conhecido como *Gold Stud Bumping*, que é uma adaptação do *wire bonding* (ver seção 2.4.4.4), onde o *ball bonding* é criado sobre o *pad* através da soldadora de fios e na sequência o fio é quebrado próximo a sua borda. A Figura 54 mostra a simulação magnética realizada para a corrente de 0,05A DC, onde é possível visualizar no detalhe o sensor com as esferas posicionado sobre a trilha.

Figura 54 – Simulação magnética da trilha superior para a proposta 3



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na segunda montagem a distância entre a face de detecção do sensor e a trilha condutora é de 0,015mm. Neste caso o *flip chip* seria implementado por um processo específico denominado *Electroless Ni/Au Bumping* no qual uma fina camada de níquel/ouro é depositada sobre os *pads* para a solda do chip.

Nesta proposta o ponto de medição foi rotacionado juntamente com o sensor. Os resultados das simulações realizadas com a trilha superior para ambas as montagens são exibidos na tabela a seguir.

Tabela 23 – Resultados das simulações para a trilha de cobre superior da proposta 3

Corrente (A)	<i>Gold Stud Bumping</i>			<i>Electroless Ni/Au Bumping</i>		
	B (DC) (mT)	B (AC) (mT)	Temp (°C)	B (DC) (mT)	B (AC) (mT)	Temp (°C)
0,05	0,164	0,164	25,10	0,206	0,206	25,10
0,1	0,328	0,328	25,38	0,412	0,412	25,38
0,5	1,640	1,638	34,53	2,059	2,059	34,52
1	3,280	3,277	63,11	4,118	4,118	63,29
2	6,561	6,554	177,70	8,236	8,236	178,43

Fonte: Elaborado pelo autor.

Conforme pode-se constatar na Tabela 23 a montagem com afastamento de 0,03mm da trilha (método *Gold Stud Bumping*) possibilita o uso de uma faixa de corrente entre 0,1A e 1A, enquanto que a montagem com afastamento de 0,015mm (método *Electroless Ni/Au Bumping*) permite uma faixa de corrente mais ampla, entre 0,05A e 1A. Os resultados mostram que o uso do *flip chip* para aproximar a face da trilha obteve uma resposta satisfatória, além disso, em comparação as propostas anteriores, observa-se uma diminuição da temperatura geral devido ao aumento da área dos *pads*.

A Tabela 24 mostra os resultados das simulações obtidos para a trilha inferior.

Tabela 24 – Resultados das simulações para a trilha de cobre inferior da proposta 3

Corrente (A)	<i>Gold Stud Bumping</i>			<i>Electroless Ni/Au Bumping</i>		
	B (DC) (mT)	B (AC) (mT)	Temp (°C)	B (DC) (mT)	B (AC) (mT)	Temp (°C)
0,5	0,149	0,149	25,42	0,152	0,152	25,42
1	0,298	0,298	26,67	0,305	0,305	26,67
2	0,596	0,596	31,68	0,609	0,609	31,68
3	0,894	0,894	40,02	0,914	0,914	40,03
5	1,490	1,490	66,73	1,523	1,523	66,74
10	2,980	2,980	192,20	3,046	3,046	192,22

Fonte: Elaborado pelo autor.

A Tabela 24 mostra que os valores obtidos para a faixa de 1A a 5A estão em conformidade com os limites estipulados em ambas montagens. Embora a trilha inferior

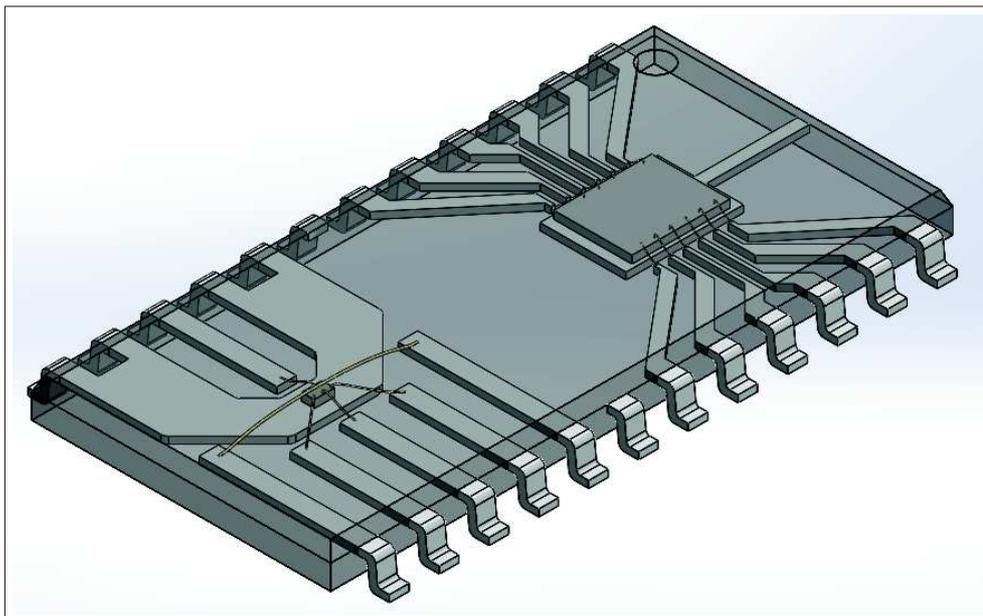
permaneça a mesma das propostas anteriores, uma pequena variação positiva é notada nos valores obtidos para a magnitude da densidade de fluxo magnético, isto ocorre porque com o *flip chip* houve uma redução da distância entre a trilha e o ponto de detecção do sensor.

Após o conjunto de simulações realizadas utilizando *flip chip*, é evidente a maior magnitude da densidade de fluxo magnético percebida em relação as propostas anteriores, isto devido a aproximação da MTJ a trilha. Na melhor situação, considerando a distância de 0,015mm, o dispositivo projetado atenderia a uma faixa de funcionamento entre 0,05A a 5A, igualando-se as possibilidades de uso obtidas na proposta anterior com o fio de ouro. Para correntes maiores, assim como nas propostas anteriores, seria necessário o uso de condutores externos.

4.3.4 Proposta de Encapsulamento 4

Diferente das propostas anteriores que foram baseadas em um encapsulamento do tipo COB, esta proposta foi desenvolvida utilizando como base um encapsulamento do tipo TSOP (*Thin Small Outline Package*), que é uma variação do SOP, porém com menor espessura. O encapsulamento mostrado na Figura 55 possui 24 pinos e dois chips e foi projetado de acordo com as dimensões recomendadas pelo guia para o projeto de TSOPs (DG-4.15B) da norma JEDEC (2004). O propósito, assim como foi feito inicialmente com o COB, é ilustrar a possibilidade do dispositivo de ser adaptado como parte de um sistema integrado.

Figura 55 – Vista isométrica com o encapsulamento projetado para a proposta 4

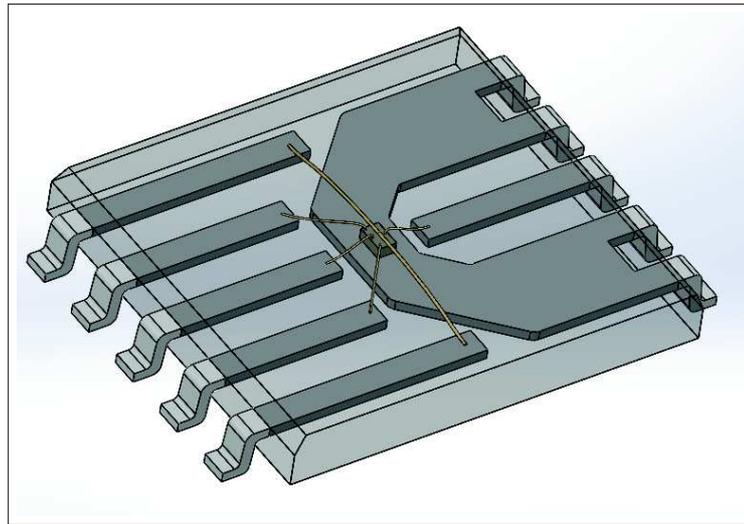


Fonte: Elaborado pelo autor.

Para as simulações, apenas a parte do encapsulamento com o sensor MTJ foi

utilizada. A estrutura é composta basicamente por dois elementos principais: um fio de ouro cruzando o topo do sensor para a detecção das correntes de menor intensidade e uma trilha no *leadframe*, embaixo do sensor, para as correntes de maior intensidade. A Figura 56 mostra a estrutura utilizada nas simulações.

Figura 56 – Vista isométrica com a parte do encapsulamento simulada na proposta 4



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os materiais utilizados são os mesmos das propostas anteriores, sendo o molde do encapsulamento caracterizado como sendo resina epoxy (EMC), o *leadframe* como cobre, o sensor MTJ como FR4 e os fios como ouro. A Tabela 4, apresentada na seção 4.1.2, mostra as propriedades associadas a estes materiais cujos valores foram inseridos nas simulações. Os coeficientes de convecção térmica (h) e de temperatura ambiente também permanecem sem alteração, sendo $10\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$ e 25°C respectivamente.

Com relação as dimensões dos elementos principais, é importante citar que a trilha no *lead frame* possui na parte central, embaixo do sensor, 1mm de largura e $0,18\text{mm}$ de espessura, enquanto que o fio de ouro, tem o comprimento de $5,08\text{mm}$ e passa a uma distância de $0,03\text{mm}$ do topo do sensor, onde está localizada a célula MTJ. Para as simulações com o fio duas montagens com diâmetros diferentes foram criadas, uma com $0,05\text{mm}$ e outra com $0,025\text{mm}$. A tabela a seguir exhibe as correntes simuladas para cada elemento.

Tabela 25 – Correntes simuladas na proposta 4

	Largura	Espessura	Diamêtros	Correntes
Fio de ouro	-	-	0,025 e 0,05mm	0,05A 0,1A 0,5A 1A 2A
Trilha no leadframe	1mm	0,18mm	-	0,5A 1A 2A 3A 5A 10A

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os resultados obtidos com as simulações realizadas utilizando como condutor o fio de ouro, para ambas as montagens (fio com diâmetro de 0,025mm e 0,05mm), são mostrados na Tabela 26.

Tabela 26 – Resultados das simulações para o fio de ouro na proposta 4

Corrente (A)	Fio diâmetro 0,025mm			Fio diâmetro 0,05mm		
	B (DC) (mT)	B (AC) (mT)	Temp (°C)	B (DC) (mT)	B (AC) (mT)	Temp (°C)
0,05	0,223	0,223	25,70	0,167	0,167	25,11
0,1	0,446	0,446	27,88	0,335	0,335	25,45
0,5	2,232	2,232	97,52	1,673	1,673	36,69
1	4,464	4,464	315,06	3,346	3,346	71,74
2	8,928	8,928	1185,20	6,691	6,691	212,21

Fonte: Elaborado pelo autor.

Analisando a Tabela 26 é possível constatar que para o fio com diâmetro de 0,025mm a faixa de corrente entre 0,05A a 0,5A ficou dentro dos limites estabelecidos de campo e temperatura, enquanto que para o fio com diâmetro de 0,05mm a faixa de corrente em conformidade ficou entre 0,1A a 1A. Este comportamento já era esperado, uma vez que quanto maior a seção do fio, menor a densidade de corrente e conseqüentemente menor é a temperatura e a magnitude da densidade de fluxo magnético resultante.

Os resultados com as simulações realizadas utilizando como condutor a trilha do *leadframe* são mostrados na tabela a seguir.

Tabela 27 – Resultados das simulações com a trilha na proposta 4

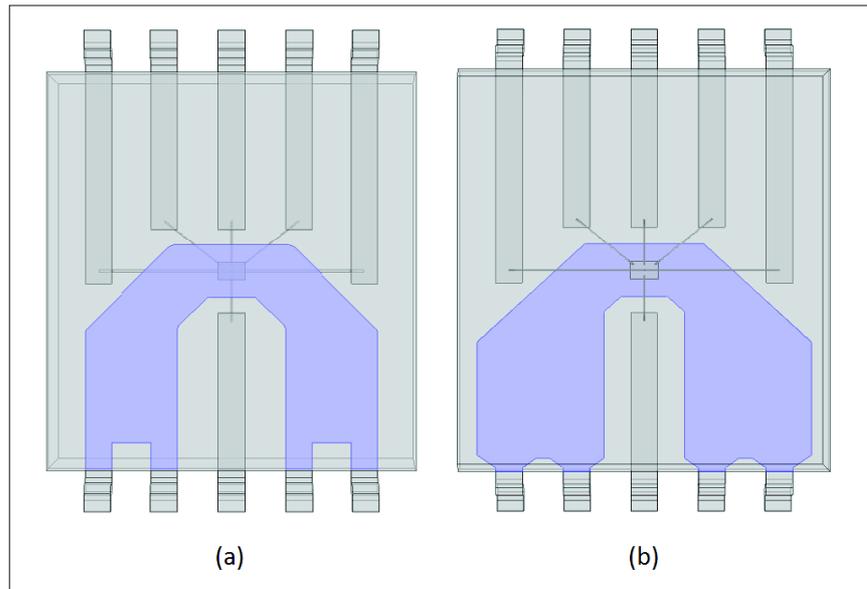
Corrente (A)	B (DC) (mT)	B (AC) (mT)	Temp (°C)
0,5	0,206	0,206	25,15
1	0,412	0,412	25,59
2	0,824	0,824	27,46
3	1,236	1,236	30,53
5	2,060	2,060	40,45
10	4,120	4,120	86,87

Fonte: Elaborado pelo autor.

Comparando os resultados da Tabela 27 com os obtidos nas propostas anteriores para a trilha inferior, constata-se um pequeno aumento na magnitude da densidade de fluxo magnético. Isto ocorre porque nas simulações com COB havia o substrato entre a trilha inferior e sensor, diferente deste caso, no qual o sensor esta diretamente sobre a trilha. Com relação a simulação térmica, é possível notar que a temperatura resultante diminuiu para toda a faixa de corrente. Isto se deve principalmente ao fato do *leadframe* ter uma espessura maior e também porque neste caso todas as faces do dispositivo estão

submetidas a troca de calor por convecção. Contudo, embora a temperatura no geral tenha diminuído, é possível observar que no caso da corrente de 10A o valor ficou muito próximo ao limiar de 85°C. Em função disto, a área da trilha foi remodelada visando aumentar a dissipação. A Figura 57 mostra a vista superior do encapsulamento, sendo (a) o projeto inicial e (b) o projeto após a alteração.

Figura 57 – Vista superior da trilha no *leadframe* sendo (a) inicial e (b) alterado



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os resultados com as simulações após a alteração na trilha do *leadframe* são mostrados na tabela a seguir.

Tabela 28 – Resultados das simulações após a modificação da trilha na proposta 4

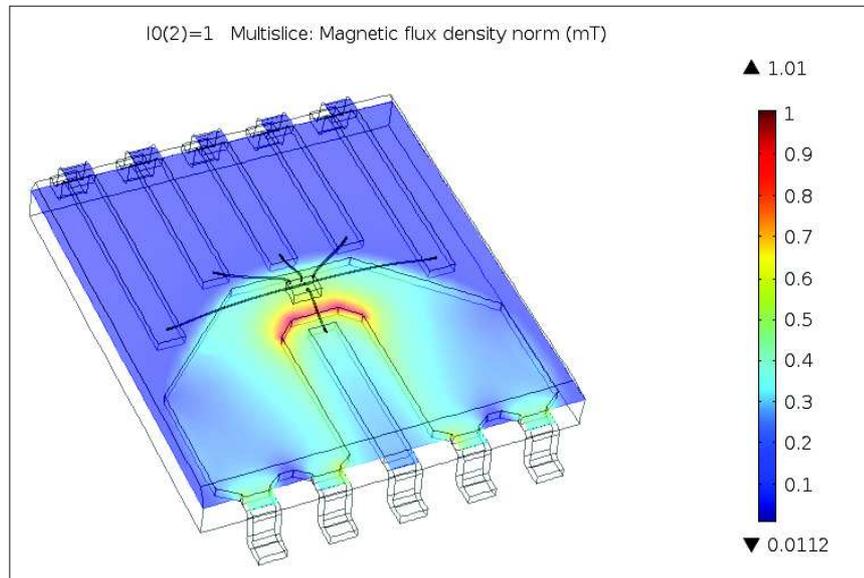
Corrente (A)	B (DC) (mT)	B (AC) (mT)	Temp (°C)
0,5	0,206	0,206	25,13
1	0,411	0,411	25,52
2	0,822	0,822	27,13
3	1,233	1,233	29,80
5	2,055	2,055	38,41
10	4,110	4,110	78,63

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os resultados da Tabela 28 mostram que o aumento na área da trilha foi eficaz para a diminuição da temperatura resultante. A temperatura observada para a corrente de 10A no ponto central da trilha, embaixo do sensor, ficou em 79,31°C, abaixo portanto dos 110°C limitados pelo FR4 do corpo do sensor. É importante observar também que

todos os valores resultantes ficaram dentro dos limites estipulados. A Figura 58 mostra a simulação 3D do campo magnético.

Figura 58 – Simulação magnética da trilha no *leadframe*



Fonte: Elaborado pelo autor.

Ao final das simulações realizadas nesta proposta pode-se concluir que o encapsulamento projetado estaria apropriado para uma faixa de corrente entre 0,1A e 10A considerando a montagem com o fio de ouro de 0,05mm de diâmetro e a trilha pós modificação.

4.3.5 Resumo da Terceira Etapa e Considerações Finais

Nesta etapa foram realizadas as modelagens térmica e magnética de diferentes propostas baseadas em dois tipos de encapsulamentos, o COB e o TSOP. Convém citar, no entanto, que os resultados obtidos podem ser estendidos a outros tipos de encapsulamentos. Um BGA, por exemplo, utilizaria esferas no lugar dos *pads* do COB, já um DIP exigiria algumas mudanças principalmente em relação ao *leadframe* do TSOP. O fato é que se as estruturas internas, como trilhas e fios permanecessem inalteradas, os resultados possivelmente seriam muito parecidos. Assim, o principal interesse nestas propostas, a partir do que já havia sido observado com o encapsulamento simplificado, foi apresentar diferentes arranjos estruturais e realizar a avaliação destes através de simulações. De forma sucinta, as propostas apresentadas ao longo desta etapa foram as seguintes:

- proposta 1 - esta proposta inicial apresentou um modelo com duas trilhas de cobre sobrepostas em um encapsulamento do tipo COB; sendo uma das trilhas localizada na parte inferior do substrato (FR4), onde foram simuladas as correntes de maior

intensidade e outra na parte superior, logo abaixo do sensor, onde foram simuladas as correntes de menor intensidade;

- proposta 2 - semelhante a anterior, esta proposta também contou com duas trilhas condutoras, porém, neste caso, como alternativa para as correntes menores, foi adicionado ao projeto um fio condutor próximo a região de detecção no topo do sensor;
- proposta 3 - diferente das propostas anteriores, esta proposta se baseou no uso do processo de *flip chip* ao invés do processo de *wire bonding* para representar as interconexões; a principal intenção neste caso foi aproximar a MTJ da trilha condutora, através da inversão do chip;
- proposta 4 - a última proposta teve como base um encapsulamento do tipo TSOP, na proposta, o sensor foi posicionado diretamente sobre uma trilha de corrente projetada no *leadframe*, enquanto que para as correntes menores, um fio de ouro sobre o sensor foi utilizado;

As propostas 3 e 4 tiveram mais de uma montagem analisada, a primeira com dois processos de *flip chip* e a segunda com dois diâmetros diferentes de fio. Além disso, ao decorrer do trabalho, algumas propostas tiveram seus projetos iniciais alterados, foi o caso da proposta 2 e 4 cujas áreas foram modificadas para permitir uma maior dissipação de calor.

Para a análise das diferentes propostas, foi utilizado um ponto de medição posicionado no centro da face de detecção do sensor, local onde está localizada a célula da MTJ. Como critério de classificação, foram mantidos os limites baseados nas características operacionais do sensor, devendo a magnitude da densidade de fluxo magnético estar entre 0,2mT a 220mT e a temperatura abaixo de 85°C, simultaneamente. Além disso, ao longo das simulações foram observados também os valores máximos de temperatura na superfície dos condutores, limitados a 110°C. Considerando estes limites e as diferentes combinações oferecidas em cada uma das propostas, foi possível estabelecer, através das simulações realizadas, para quais faixas de corrente o dispositivo poderia ser utilizado, conforme pode ser visto na tabela a seguir.

Tabela 29 – Valores de corrente atendidos por proposta

	Faixas de corrente
Proposta 1	0,5A a 5A
Proposta 2	0,05 a 5A
Proposta 3	0,05 a 5A
Proposta 4	0,1 a 10A

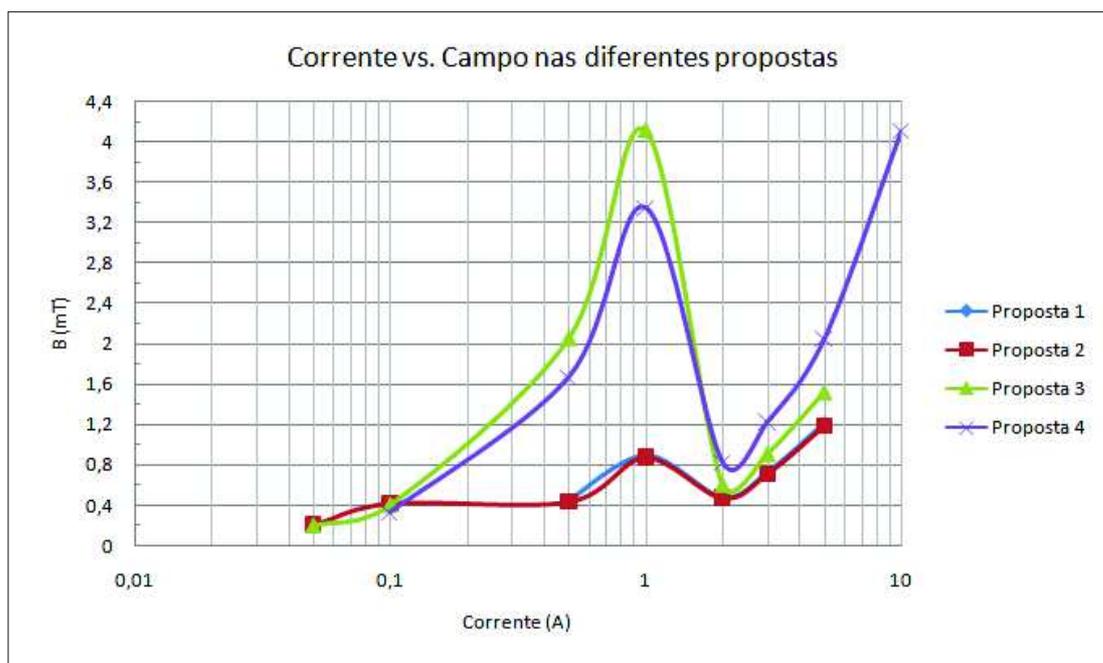
Fonte: Elaborado pelo autor.

Conforme pode ser observado na Tabela 29, de acordo com as simulações, a proposta 1 foi a que apresentou a maior limitação, as propostas 2 e 3 resultaram em faixas de uso semelhantes e obtiveram a maior sensibilidade, já a proposta 4 foi a que alcançou o maior valor de corrente operacional. Lembrando que as simulações são válidas para correntes DC e AC (60Hz), sendo que no caso desta última os valores correspondem ao valor de pico da corrente (V_P).

É importante considerar também que para a proposta 2 seria necessária a disponibilidade de três pares de terminais a fim de permitir o uso em toda a faixa mencionada, enquanto que para as demais propostas, a combinação de dois pares de terminais seria suficiente.

O gráfico a seguir foi gerado com os valores da magnitude da densidade de fluxo magnético (B) correspondentes aos níveis de corrente simulados. Para gerar o gráfico foram selecionados os maiores valores considerados válidos (dentro dos limites estabelecidos) resultantes em cada proposta, independente do arranjo utilizado.

Figura 59 – Comparação do campo resultante entre as propostas

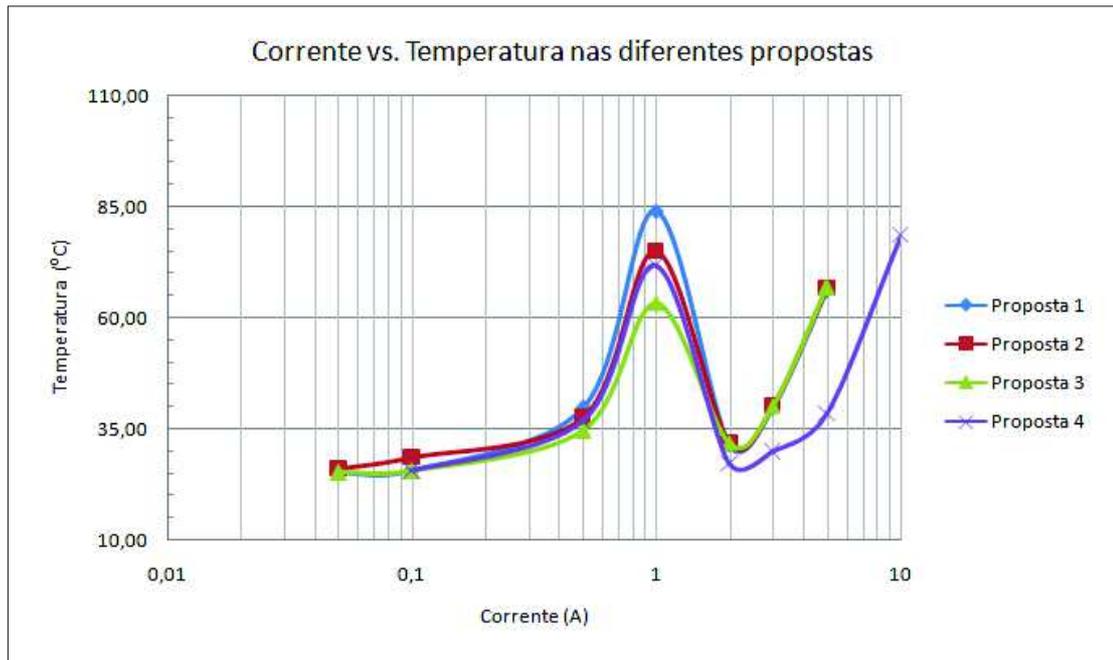


Fonte: Elaborado pelo autor.

De um modo geral, através do gráfico exibido na Figura 59, é possível observar que a proposta 3 foi a que resultou nos maiores valores da magnitude da densidade de fluxo magnético até a corrente de 1A, enquanto que para as correntes de maior intensidade, as melhores respostas foram obtidas com a proposta 4. A proposta 2 apresentou uma pequena vantagem sobre as demais, na faixa entre 0,05A a 0,1A, enquanto que a proposta 1 foi a que apresentou o pior desempenho. É importante citar que, quanto maior a variação na amplitude do sinal resultante para uma determinada faixa de corrente, maior será a

resolução obtida em uma eventual digitalização do sinal. No gráfico, observa-se ainda que, em todos os casos ocorre um incremento no valor do campo resultante até 1A e logo após há uma queda, isto se deve a mudança no condutor utilizado para a detecção, que em função do limite de temperatura deixa de ser o fio ou a trilha superior e passa a ser a trilha inferior, mais larga e espessa. A Figura 60 exhibe o gráfico correspondente para a temperatura resultante.

Figura 60 – Comparação da temperatura resultante entre as propostas



Fonte: Elaborado pelo autor.

Ao decorrer desta etapa, quatro diferentes propostas foram apresentadas e analisadas. Foi possível constatar que são muitos os aspectos que devem ser considerados no projeto de um encapsulamento deste tipo. Conforme ficou evidenciado, para a escolha de uma das propostas, diferentes aspectos podem ser considerados, como por exemplo, faixa de corrente operacional, sensibilidade e até mesmo a magnitude da densidade de fluxo magnético para uma determinada corrente. De fato, cada uma das propostas pode apresentar vantagens e desvantagens de acordo com os critérios de seleção tomados. Portanto, a fim de complementar esta análise e auxiliar na definição, na etapa a seguir será feita uma breve análise dos custos relacionados a fabricação de cada um dos tipos de encapsulamentos propostos.

4.4 Breve Análise dos Custos Envolvidos

O custo de um encapsulamento tem muitas variáveis. Por conta disso, obter valores absolutos não é uma tarefa trivial. De um modo geral, isto é possível apenas quando todas

as informações de projeto são conhecidas e há um plano de negócios bem definido. Todavia, a literatura técnica e os fornecedores de serviços são uma boa fonte de informações quando o que se busca são informações preliminares e os custos relativos entre os diferentes tipos de encapsulamento e tecnologias envolvidas.

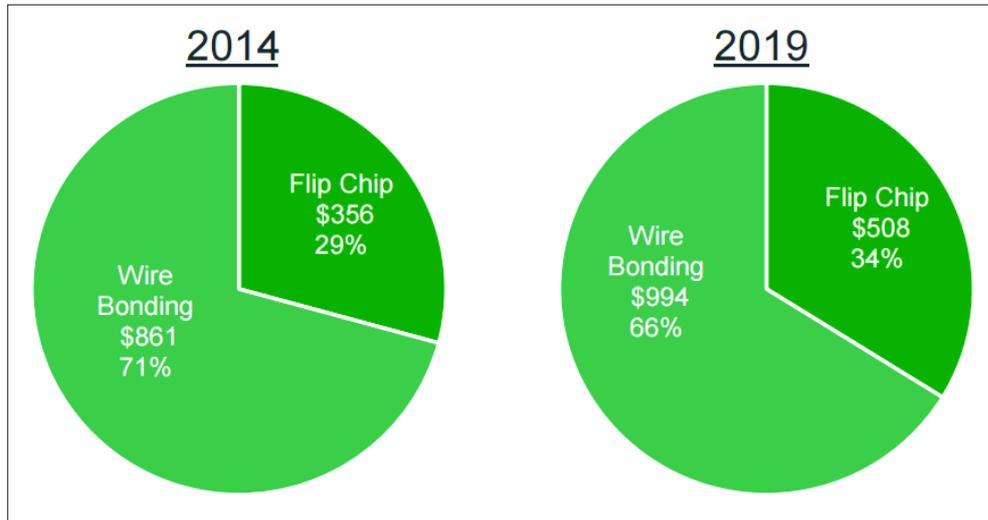
Uma das principais questões relacionada aos custos é a complexidade do dispositivo. Quanto mais complexo o encapsulamento maior o custo. Os mais recentes desafios envolvem, por exemplo, encapsulamentos destinados a sistemas complexos de alta densidade, circuitos flexíveis e a dispositivos micro-eleto-mecânicos (MEMS), diferente das propostas apresentadas neste trabalho, que envolvem tecnologias já bem estabelecidas. Para Olofsson (2014) simplicidade e volume são questões de primeira ordem, por exemplo, um encapsulamento do tipo BGA simples, que utiliza *wire-bonding*, pode custar centavos de dólares em larga escala de produção, enquanto que, um encapsulamento grande e personalizado que utiliza *flip chip* e sua produção seja em baixo volume pode custar dezenas de dólares. Obviamente que para se ter a projeção do volume de produção de um determinado dispositivo, há a necessidade de um estudo acerca da demanda de mercado, o que não é o escopo deste trabalho. No entanto, em termos de complexidade, é possível, pelo menos, se ter uma ideia a partir dos principais componentes envolvidos, dos custos relativos entre as propostas apresentadas.

Nas propostas aqui apresentadas os principais aspectos que correlacionam a complexidade aos custos envolvidos são o tipo de interconexão, se feita por *wire bonding* ou *flip chip* e o tipo de encapsulamento, se utiliza substrato (FR4) ou *leadframe*. O processo de *wire bonding* seria empregado nas propostas 1,2 e 4 enquanto que o *flip chip* apenas na proposta 3. Já o uso de *leadframe* esta associado apenas a proposta 4 que foi fundamentada em um encapsulamento do tipo TSOP, enquanto que o FR4 é utilizado em todas as demais propostas, uma vez que estas foram baseadas em um encapsulamento do tipo COB.

Segundo Madou (2011) o processo de *flip chip* resulta em um dispositivo com excelentes características elétricas e alta confiabilidade, porém é uma tecnologia muito exigente, tanto para se estabelecer quanto para operar, na qual os custos iniciais são altos e favorecem aplicações de alto volume ou *high-end*. Ainda, segundo o autor, a tecnologia de *flip chip* é potencialmente mais barata do que a de *wire bonding*, uma vez que todas as conexões são feitas simultaneamente, enquanto que no *wire bonding* uma única ligação é feita neste mesmo tempo. Na prática, no entanto, o custo benefício não é sempre alcançado, especialmente para pequenas quantidades, devido a imaturidade dos processos envolvidos, como por exemplo, o processo de tratamento dos *pads* para a colocação das esferas, conhecido como *Under-Bump-Metallization* (UBM), cujos custos ainda são altos. O *wire bonding* por outro lado, já é um processo bem estabelecido na indústria, tendo sido inventado a mais de 25 anos, ainda é o mais utilizado e em geral é o mais barato. Atualmente, devido ao alto custo associado ao ouro utilizado nos fios, outros materiais e

ligas estão sendo utilizados e pesquisados (GAN; HASHIM, 2015). Um gráfico comparativo com o uso das duas tecnologias para o ano de 2014 e a perspectiva para 2019 é exibido na Figura 61, onde as cifras correspondem a milhões de dólares comercializados.

Figura 61 – Comparativo de uso entre os processos *wire bonding* e *flip chip*



Fonte: Adaptado de Besi (2015).

Com base no que foi exposto e considerando também o fato de que o dispositivo proposto neste trabalho não possui o mesmo nível de complexidade de um processador sofisticado, é conveniente considerar o *wire bonding* com um menor custo de empregabilidade do que o *flip chip*, desta forma as propostas 1,2 e 4 teriam uma vantagem em relação aos custos envolvidos. Em relação a proposta 3, que utilizou *flip chip*, é preciso lembrar que duas montagens foram simuladas, uma baseada no método de *Gold Stud Bumping* que para sua execução utilizaria o mesmo ferramental de *wire bonding* sem a necessidade de UBM e por conta disto apresenta menor custo do que a outra, baseada no método *Electroless Ni/Au Bumping*, que necessitaria de UBM e ferramental específico. No entanto, convém lembrar também que os resultados obtidos com as simulações foram superiores para o segundo método citado.

Outro aspecto que pode ser considerado na comparação dos custos envolvidos entre as propostas diz respeito ao tipo de encapsulamento utilizado. As propostas 1,2 e 3 foram baseadas em um encapsulamento tipo COB que utiliza como base uma placa de FR4, material muito comum na indústria eletroeletrônica. O COB dispensa o uso de pré forma no molde e o uso de ferramentas de corte e conformação que seriam necessários para a implementação de um encapsulamento do tipo TSOP, como o da proposta 4. Além disso, embora o TSOP seja um tipo de encapsulamento bastante difundido e associado a dispositivos de baixo custo, ele necessita de um *leadframe*, que neste caso, em função da trilha inferior exigiria também uma customização, fugindo dos padrões disponíveis em catálogo e elevando os custos.

Conforme citado no início desta seção, os custos absolutos são difíceis de serem previstos em função da grande quantidade de informações requeridas. No entanto, a partir do que foi exposto, é possível definir as propostas 1 e 2 como sendo as de menor custo, enquanto que as propostas 3 e 4 exigiriam um maior custo de implementação, podendo ser considerada ainda uma possível vantagem da proposta 4 em relação a 3, já que o UBM ainda é um processo caro, utilizado principalmente em dispositivos de larga escala com alto valor agregado.

4.5 Comparação de Resultados e Definição de uma das Propostas

Conforme estabelecido na metodologia deste trabalho, após realizar a modelagem das propostas, analisá-las e avaliar os custos envolvidos, o passo seguinte é eleger uma delas para o dispositivo pretendido. Com este objetivo, a partir do que foi observado nas seções anteriores a seguinte tabela comparativa foi montada:

Tabela 30 – Tabela comparativa entre as propostas

	Faixa de Uso	Magnitude B	Custo Relativo
Proposta 1	0,5A a 5A	Baixa	Baixo
Proposta 2	0,05 a 5A	Baixa	Baixo
Proposta 3	0,05 a 5A	Alta	Alto
Proposta 4	0,1 a 10A	Alta	Médio

Fonte: Elaborado pelo autor.

A Tabela 30 reúne três características importantes observadas nas propostas apresentadas. A primeira delas, a faixa de uso, diz respeito a faixa de corrente na qual o dispositivo estaria apto a operar, conforme os resultados obtidos com as simulações. A segunda coluna, Magnitude B, qualifica a proposta quanto a magnitude da densidade de fluxo magnético em função das demais propostas, conforme foi observado no gráfico da Figura 59, exibido na seção 4.3.5. A última coluna, classifica as propostas quanto ao custo relativo, de acordo com o que foi abordado na seção anterior.

Através de uma rápida análise da Tabela 30 é possível constatar que não existe uma proposta que reúna todos os atributos buscados, ou seja, ampla faixa de uso, alta magnitude da densidade de fluxo magnético em função da corrente e custo relativo baixo, sendo necessário, portanto, que critérios de seleção sejam adotados. Assim, convencionou-se que o principal propósito do dispositivo proposto é atender a uma faixa de corrente ampla com a menor intensidade possível. Além disso, sua utilização seria focada no uso em equipamentos eletroeletrônicos de baixo custo. Estas condições estão em consonância com as características das propostas apresentadas, onde o que se buscou foi uma estrutura que detectasse diferentes níveis de intensidade de corrente e fosse baseada em processos padronizados da indústria. Deste modo, a partir dos critérios de escolha adotados, a

proposta 2 foi considerada a mais apropriada, uma vez que ela reúne características como faixa de uso ampla e menor custo relativo.

5 Conclusões e Trabalhos Futuros

Este trabalho apresentou uma análise a respeito de diferentes propostas de encapsulamento para um sensor magnético (MTJ), cujo propósito é sua utilização em aplicações que envolvam o monitoramento de correntes elétricas em circuitos eletrônicos. A análise das propostas foi realizada com o auxílio de ferramentas de modelagem por software e embora não tenha se produzido como resultado a implementação física das mesmas, os modelos foram baseados em processos e materiais conhecidos da indústria, visando assim uma possível aplicação prática.

Ao todo foram apresentadas quatro diferentes propostas de encapsulamento. Estas propostas foram avaliadas segundo características funcionais, como faixa de operação, sensibilidade magnética e desempenho térmico, e também quanto a aspectos econômicos, como o custo relativo entre elas. Ao final, com base nos resultados obtidos e nos critérios adotados, uma das propostas foi escolhida como a mais apropriada para o dispositivo.

Os objetivos propostos foram atingidos e embora diversos aperfeiçoamentos ainda sejam possíveis, o resultado final foi considerado satisfatório. A pesquisa realizada e a definição de uma metodologia de trabalho mostraram ter fundamental importância para se alcançar estes objetivos. Entre as principais dificuldades encontradas no decorrer do trabalho pode-se citar a definição de variáveis significativas para a modelagem das propostas, como por exemplo, a escolha das dimensões dos condutores e dos níveis de corrente. Com o objetivo de amenizar tais dificuldades, foi realizado previamente um estudo simulando diferentes condições em um modelo de encapsulamento simplificado, este estudo foi muito importante, na medida que permitiu através dos resultados obtidos, reduzir o tempo e a quantidade de variáveis envolvidas para o projeto e a análise das propostas.

Dois tipos de encapsulamento foram adotados como base para as propostas apresentadas, o COB e o TSOP. Ambos são encapsulamentos considerados de baixo custo e são bastante difundidos no mercado. A principal diferença entre as propostas ficou por conta do arranjo estrutural dos condutores utilizados para a detecção do campo magnético. No final, a proposta 2, baseada em um encapsulamento do tipo COB cujo arranjo é composto pela combinação de um fio passando sobre a MTJ e duas diferentes trilhas passando por baixo, foi escolhida por reunir atributos como maior faixa de detecção em termos de corrente elétrica e menor custo relativo de implementação.

Embora o resultado final deste trabalho tenha sido a definição de um encapsulamento dedicado para um sensor magnético, correspondendo portanto ao objetivo principal, pode-se concluir que o principal mérito deste trabalho foi demonstrar a possibilidade de se

utilizar uma ferramenta de software, para através de ambiente virtual realizar a modelagem e análise deste tipo de dispositivo, antecipando resultados e economizando recursos que provavelmente seriam gastos com a implementação para fins de prototipagem.

No que diz respeito à continuidade deste trabalho, as seguintes sugestões são feitas:

- analisar outras propostas de encapsulamento, como por exemplo, a modelagem de encapsulamentos contendo concentradores de fluxo magnético, com o intuito de adaptar o dispositivo ao uso em faixas de corrente de menor intensidade;
- aprimorar a análise a respeito da proposta escolhida, podendo isto ser feito pela inserção de pequenas modificações no modelo, como por exemplo, a utilização de mais de um fio de ouro sobre a MTJ e a seleção de diferentes materiais, ou através de estudos envolvendo fatores externos como fontes de calor e de campo magnético, ou ainda, pela interação do modelo em outros circuitos sob um mesmo encapsulamento;
- realizar uma comparação com outras ferramentas de software através da implantação de propostas semelhantes, como forma de avaliar os resultados alcançados e aperfeiçoar a metodologia de trabalho;
- implementar e caracterizar o dispositivo, embora não seja uma tarefa tão acessível, a prototipagem e caracterização do dispositivo escolhido ou mesmo de uma das propostas apresentadas no decorrer deste trabalho, permitiria validar os resultados obtidos com as simulações e estabelecer possíveis níveis de incerteza através da comparação de resultados.

Referências

- ADAM, J. New correlations between electrical current and temperature rise in pcb traces. *Twentieth Annual IEEE Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium (IEEE Cat. No.04CH37545)*, p. 292–299, 2004. Citado 3 vezes nas páginas 70, 71 e 77.
- ALLEGRO. 2015. Acesso em: 18 jan. 2015. Disponível em: <<http://www.allegromicro.com>>. Citado na página 49.
- AMS. 2015. Acesso em: 18 jan. 2015. Disponível em: <<http://ams.com/eng>>. Citado na página 50.
- ARIKAN, M. et al. Dc and ac characterization of mgo magnetic tunnel junction sensors. *IEEE Transactions on Magnetics*, v. 49, n. 11, p. 5469–5474, 2013. Citado na página 27.
- BALTES, H. P.; POPOVIC, R. S. Integrated semiconductor magnetic field sensors. *Proceedings of the IEEE*, v. 74, n. 8, p. 1107–1132, 1986. Citado na página 37.
- BARADUC, C.; CHSHIEV, M.; DIENY, B. Spintronic phenomena: Giant magnetoresistance, tunnel magnetoresistance and spin transfer torque. In: REIG, C.; CARDOSO, S.; MUKHOPADHYAY, S. (Ed.). *Giant Magnetoresistance (GMR) Sensors: From Basis to State-of-the-Art Applications*. Germany: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2013. p. 1–31. Citado na página 39.
- BELTRAN, H. et al. Modeling of magnetoresistive-based electrical current sensors: A technological approach. *IEEE Sensors Journal*, v. 7, n. 11, p. 1532–1537, 2007. Citado 2 vezes nas páginas 61 e 62.
- BESI. *Investor Presentation July 2015*. 2015. Acesso em: 28 fev. 2016. Disponível em: <http://www.besi.com/fileadmin/data/Investor_Relations/Investor_Presentations/Investor_Presentation_July_2015.pdf>. Citado na página 111.
- BHANDARKAR, N. et al. Effect of package construction on thermal performance of plastic ic packages. *Proceedings of the 1997 1st Electronic Packaging Technology Conference (Cat. No.97TH8307)*, p. 65–68, 1997. Citado 2 vezes nas páginas 68 e 70.
- BROOKS, D. G.; ADAM, J. *Trace Currents and Temperatures Revisited*. 2015. Acesso em: 30 out. 2015. Disponível em: <<http://www.ultracad.com/articles/pcbtemp.pdf>>. Citado 2 vezes nas páginas 79 e 97.
- CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. *Fundamentals of Materials Science and Engineering : An Integrated Approach*. USA: John Wiley & Sons, Inc., 2008. Citado na página 58.
- CENGEL, Y. A. *Heat Transfer: A Practical Approach*. USA: McGraw-Hill, 2003. Citado 2 vezes nas páginas 56 e 57.
- CROCUS: Product brief ctsr200x series. 2014. Acesso em: 12 jan. 2015. Disponível em: <http://www.crocus-technology.com/crocus_product_SensorsCTSSeries.php>. Citado 2 vezes nas páginas 43 e 44.

CROCUS: Application note, an105, rev.0.1. 2015. Acesso em: 02 out. 2015. Disponível em: <http://www.crocus-technology.com/documents/AN105_SimulationofMagneticField.pdf>. Citado 2 vezes nas páginas 73 e 79.

CUBELLS, M. D. et al. Magnetic tunnel junction (mtj) sensors for integrated circuits (ic) electric current measurement. *IEEE SENSORS 2013 - Proceedings*, v. 1, n. 1c, 2013. Citado 4 vezes nas páginas 15, 59, 60 e 79.

DATTA, M. Electrochemical processing technologies and their impact in microelectronic packaging. In: DATTA, M.; OSAKA, T.; SCHULTZE, J. W. (Ed.). *Microelectronic packaging*. USA: CRC Press, 2005. Citado na página 53.

DATTA, M.; OSAKA, T.; SCHULTZE, J. W. (Ed.). *Microelectronic packaging*. USA: CRC Press, 2005. Nenhuma citação no texto.

DU, W. Y. *Resistive, Capacitive, Inductive, and Magnetic Sensor Technologies*. USA: CRC Press, 2014. Citado na página 40.

ERNST, D. et al. Packaging technologies for (ultra-)thin sensor applications in active magnetic bearings. *Electronics Technology (ISSE), Proceedings of the 2014 37th International Spring Seminar on*, p. 125–129, 2014. Citado na página 59.

FERNANDES, I. L. *Polarização Magnética das Correntes de Tunelamento*. Dissertação (Mestrado) — Instituto de Física da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Brasil, 2011. Citado na página 41.

FERT, A. Historical overview: From electron transport in magnetic materials to spintronics. In: TSYMBAL, E. Y.; ZUTIC, I. (Ed.). *Handbook of Spin Transport and Magnetism*. USA: CRC Press, 2012. p. 3–15. Citado na página 39.

FJELSTAD, J.; MITCHELL, C. *The Past, Present and Future of IC Packaging: Chip scale review magazine*. 2004. Acesso em: 12 jan. 2015. Disponível em: <<http://www.chipsalereview.com/issues/0704/article.php?type=feature&article=f7>>. Citado 2 vezes nas páginas 45 e 46.

FLORES, R. J. G. R. G. *MgO Magnetic Tunnel Junction Sensors in Full Wheatstone Bridge Configuration for In-Chip Current Field Detection*. Dissertação (Mestrado) — Instituto Superior Tecnico da Universidade Tecnica de Lisboa, Lisboa, 2010. Citado na página 29.

FREESCALE. *Application Note, AN3846, Rev.3.0: Wafer level chip scale package (wlcsip)*. 2012. Acesso em: 18 jan. 2015. Disponível em: <<http://www.mouser.com/pdfdocs/AN3846.PDF>>. Citado na página 50.

GAN, C. L.; HASHIM, U. *Evolutions of Bonding Wires Used in Semiconductor Electronics: Perspective Over 25 Years*. [S.l.]: Springer New York LLC, 2015. Citado na página 111.

GINSBERG, G. L. *Electronic Equipment Packaging Technology*. USA: Springer Science+Business Media, LLC, 1992. Citado na página 45.

GREIG, W. *Integrated Circuit Packaging, Assembly and Interconnections*. USA: Springer Science+Business Media, LLC, 2007. Citado 2 vezes nas páginas 53 e 56.

- GUENIN, B. *Update on JEDEC Thermal Standards. Electronics Cooling*. 2015. Acesso em: 13 jan. 2015. Disponível em: <<http://item-media.uberflip.com/i/83638/35>>. Citado na página 46.
- HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. *Fundamentals of Physics Extended*. 9. ed. USA: John Wiley & Sons, Inc., 2010. Citado 5 vezes nas páginas 32, 34, 35, 36 e 37.
- HERBSOMMER, J. a. Effect of epoxy molding compound on the electrical performance of microelectronic devices. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, v. 2, n. 8, p. 1293–1297, 2012. Citado na página 68.
- HONEYWELL. 2015. Acesso em: 18 jan. 2015. Disponível em: <<http://honeywell.com/Pages/Home.aspx>>. Citado na página 48.
- IBM: System 360 from computers to computer systems. 2015. Acesso em: 12 jan. 2015. Disponível em: <<http://www-03.ibm.com/ibm/history/ibm100/us/en/icons/system360/breakthroughs/>>. Citado na página 45.
- ISENTEK. 2015. Acesso em: 18 jan. 2015. Disponível em: <<http://www.isentek.com/index.html>>. Citado na página 50.
- ITRS: Assembly and packaging. 2011. Citado na página 29.
- JILES, D. *Introduction to Magnetism and Magnetic Materials*. USA: Springer Science+Business Media BV, 1991. Citado na página 32.
- JOINT ELECTRON DEVICE ENGINEERING COUNCIL - JEDEC. *DG-4.15B: Design requirements for outlines of solid state and related products*. USA, 2004. 13 p. Citado na página 102.
- JULLIERE, M. Tunneling between ferromagnetic films. *Physics Letters A*, v. 54, n. 3, p. 225–226, 1975. Citado na página 42.
- KIM, N.-H.; SANKAR, B. V. *Introdução à Análise e ao Projeto em Elementos Finitos*. Brasil: LTC, 2011. Citado na página 67.
- KOHL, P. A. Compliant interconnects. In: DATTA, M.; OSAKA, T.; SCHULTZE, J. W. (Ed.). *Microelectronic packaging*. USA: CRC Press, 2005. Citado na página 52.
- LECLAIR, P. R.; MOODERA, S. J. Tunneling magnetoresistance: Experiment (non-mgo magnetic tunnel junctions). In: TSYMBAL, E. Y.; ZUTIC, I. (Ed.). *Handbook of Spin Transport and Magnetism*. USA: CRC Press, 2012. p. 197–217. Citado 2 vezes nas páginas 38 e 40.
- LEE, N.-C. *Reflow Soldering Processes and Troubleshooting: SMT, BGA, CSP and Flip Chip Technologies*. USA: Newnes, 2002. Citado na página 54.
- LENZ, J.; EDELSTEIN, A. S. Magnetic sensors and their applications. *IEEE Sensors Journal*, v. 6, n. 3, p. 631–649, 2006. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 37.
- LIN, C. H.; WONG, W. W.; LIU, B. M. Current density and hot spot prediction using electrical-thermal co-simulation for multi-layer ic packages. In: *Proceedings of the Electronic Packaging Technology Conference, EPTC*. [S.l.: s.n.], 2006. Citado na página 59.

- LIU, S.; LIU, Y. *Modeling and Simulation for Microelectronic Packaging Assembly*. Singapura: John Wiley & Sons, (Asia) Pte Ltd., 2011. Citado na página 69.
- LOPES, A. et al. Mgo magnetic tunnel junction electrical current sensor with integrated ru thermal sensor. *IEEE Transactions on Magnetics*, v. 49, n. 7, p. 3866–3869, 2013. Citado 2 vezes nas páginas 29 e 59.
- LV, Y.; WANG, X.; JIN, J. Simulation study of coils sensor preferences in magnetic induction tomography. In: *Proceedings of the World Congress on Intelligent Control and Automation (WCICA)*. [S.l.: s.n.], 2010. Citado na página 59.
- MADOU, M. J. *Fundamentals of Microfabrication and Nanotechnology*. USA: CRC Press, 2011. III. Citado na página 110.
- MAHDI, a. E.; PANINA, L.; MAPPS, D. Some new horizons in magnetic sensing: High-tc squids, GMR and GMI materials. *Sensors and Actuators, A: Physical*, v. 105, n. 3, p. 271–285, 2003. Citado na página 27.
- MENG, C. C. et al. Thermo-mechanical modeling of a 3d flip chip fully populated bga package. In: *2010 12th Electronics Packaging Technology Conference, EPTC 2010*. [S.l.: s.n.], 2010. Citado na página 59.
- MG CHEMICALS: Thermally conductive epoxy encapsulating & potting compound 832tc technical data sheet. 2016. Acesso em: 11 abr. 2016. Disponível em: <<http://www.mgchemicals.com/downloads/tds/tds-832tc-2parts.pdf>>. Citado na página 69.
- MITTAL, A. *PCB Substrates: Knowing Your Dielectric Material's Properties*. 2015. Acesso em: 24 mar. 2016. Disponível em: <<https://www.protoexpress.com/blog/pcb-substrates-knowing-dielectric-materials-properties/>>. Citado na página 69.
- MULTIDIMENSION: Introduction to tmr magnetic sensors. 2015. Acesso em: 30 ago. 2015. Disponível em: <<http://www.dowaytech.com/en/1776.html>>. Citado na página 39.
- NVE. 2015. Acesso em: 18 jan. 2015. Disponível em: <<http://www.nve.com/index.php>>. Citado na página 48.
- OLOFSSON, A. *An Introduction to Semiconductor Economics*. 2014. Acesso em: 11 fev. 2016. Disponível em: <<http://www.adapteva.com/andreas-blog/semiconductor-economics-101/>>. Citado na página 110.
- PALLAS-ARENY, R.; WEBSTER, J. G. *Sensors and Signal Conditioning*. USA: John Wiley & Sons, Inc., 2001. Citado 2 vezes nas páginas 34 e 56.
- PALOMAR. 2016. Acesso em: 11 jan. 2016. Disponível em: <<http://www.palomartechnologies.com/products/8000-wire-bonder>>. Citado na página 95.
- PHAN, K. L. et al. Geometry optimization of tmr current sensors for on-chip ic testing. *IEEE Transactions on Magnetics*, v. 41, n. 10, p. 3685–3687, 2005. Citado na página 61.
- PRYOR, R. W. *Multiphysics Modeling Using COMSOL: a First Principles Approach*. USA: Jones and Bartlett Publishers, LLC, 2011. Citado na página 67.

- REIG, C.; CARDOSO, S.; MUKHOPADHYAY, S. (Ed.). *Giant Magnetoresistance (GMR) Sensors*. Germany: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2013. Nenhuma citação no texto.
- REIG, C.; CUBELLS-BELTRÁN, M. D. GMR based sensors for ic current monitoring. In: REIG, C.; CARDOSO, S.; MUKHOPADHYAY, S. (Ed.). *Giant Magnetoresistance (GMR) Sensors: From Basis to State-of-the-Art Applications*. Germany: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2013. p. 103–131. Citado 2 vezes nas páginas 28 e 29.
- REIG, C.; CUBELLS-BELTRÁN, M.-D.; RAMÍREZ, D. Magnetic field sensors based on giant magnetoresistance (GMR) technology: Applications in electrical current sensing. *Sensors*, v. 9, n. 10, p. 7919–7942, 2009. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 29.
- REIG, C. et al. Design, fabrication, and analysis of a spin-valve based current sensor. *Sensors and Actuators, A: Physical*, v. 115, n. 2-3 SPEC. ISS., p. 259–266, 2004. Citado na página 61.
- ROLOFF, M. L.; ADUR, M. P. Uma biblioteca de processamento de imagens para o controle de qualidade utilizando dispositivos portáteis (pdas) em sistemas industriais de visão. In: *XIII SEMINCO, Seminário de Computação, set. 2004*. [S.l.: s.n.], 2004. Citado na página 63.
- SÁNCHEZ, J. et al. Electrical characterization of a magnetic tunnel junction current sensor for industrial applications. v. 48, n. 11, p. 2823–2826, 2012. Citado 3 vezes nas páginas 27, 29 e 60.
- SHINKAWA. 2016. Acesso em: 11 jan. 2016. Disponível em: <http://www.shinkawa.com/en/products/wire_bonder/>. Citado na página 95.
- TAKYU, S. et al. Novel wafer dicing and chip thinning technologies realizing high chip strength. *Proceedings - Electronic Components and Technology Conference*, v. 2006, p. 1623–1627, 2006. Citado na página 51.
- TIPLER, P. A.; MOSCA, G. *Physics for Scientists and Engineers*. USA: W. H. Freeman and Company, 2004. Citado 3 vezes nas páginas 31, 32 e 36.
- TSYMBAL, E. Y.; ZUTIC, I. (Ed.). *Handbook of Spin Transport and Magnetism*. USA: CRC Press, 2012. Nenhuma citação no texto.
- TUMANSKI, S. *Handbook of Magnetic Measurements*. USA: CRC Press, 2011. Citado 5 vezes nas páginas 32, 33, 34, 35 e 37.
- TUMANSKI, S. Modern magnetic field sensors – a review. *Przeegląd Elektrotechniczny*, n. 10, p. 74–80, 2013. Citado 2 vezes nas páginas 37 e 38.
- TUMMALA, R. R. *Fundamentals of Microsystems Packaging*. USA: McGraw-Hill, 2001. Citado 13 vezes nas páginas 29, 44, 47, 49, 50, 51, 53, 55, 56, 57, 58, 69 e 141.
- TUMMALA, R. R.; RYMASZEWSKI, E. J.; KLOPFENSTEIN, A. G. *Microelectronics Packaging Handbook*. USA: Chapman & Hall, 1997. Citado 3 vezes nas páginas 49, 52 e 54.
- ULABY, F. T. *Eletromagnetismo para Engenheiros*. BRASIL: Bookman, 2007. Citado 2 vezes nas páginas 34 e 36.

- WENTWORTH, S. M. *Eletromagnetismo aplicado, abordagem antecipada das linhas de transmissão*. BRASIL: Bookman, 2009. Citado 4 vezes nas páginas 31, 35, 37 e 56.
- WERESZCZAK, A. a. et al. Thermally conductive mgo-filled epoxy molding compounds. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, v. 3, n. 12, p. 1994–2005, 2013. Citado na página 68.
- XIAO, G. Magnetoresistive sensors based on magnetic tunneling. In: TSYMBAL, E. Y.; ZUTIC, I. (Ed.). *Handbook of Spin Transport and Magnetism*. USA: CRC Press, 2012. p. 665–685. Citado 4 vezes nas páginas 37, 38, 39 e 42.
- YUASA, S. Tunneling magnetoresistance: Experiment (mgo magnetic tunnel junctions). In: TSYMBAL, E. Y.; ZUTIC, I. (Ed.). *Handbook of Spin Transport and Magnetism*. USA: CRC Press, 2012. p. 217–233. Citado 2 vezes nas páginas 40 e 41.
- YUASA, S.; DJAYAPRAWIRA, D. D. Giant tunnel magnetoresistance in magnetic tunnel junctions with a crystalline mgo(001) barrier. *Journal of Physics D: Applied Physics*, v. 40, n. 21, p. R337–R354, 2007. Citado na página 43.
- ZHU, J.; PARK, C. Magnetic tunnel junctions. *Materials Today*, v. 9, n. 11, p. 36–45, 2006. Citado na página 41.

Apêndices

APÊNDICE A – Estudo de Caso 1

Tabela 31 – Resultados para o estudo de caso 1 com espessura de trilha de 0,035mm (10z)

Densidade fluxo (mT)				Temperatura (°C)			
I (A)	l_trilha (mm)	Ponto 1	Ponto 2	I (A)	l_trilha (mm)	Ponto 1	Ponto 2
0,005	0,1	0,02	0,00	0,005	0,1	25,00	25,00
0,005	0,5	0,01	0,00	0,005	0,5	25,00	25,00
0,005	1	0,00	0,00	0,005	1	25,00	25,00
0,005	2	0,00	0,00	0,005	2	25,00	25,00
0,005	3	0,00	0,00	0,005	3	25,00	25,00
0,05	0,1	0,22	0,04	0,05	0,1	25,12	25,12
0,05	0,5	0,06	0,03	0,05	0,5	25,02	25,02
0,05	1	0,03	0,02	0,05	1	25,01	25,01
0,05	2	0,02	0,01	0,05	2	25,01	25,01
0,05	3	0,01	0,01	0,05	3	25,00	25,00
0,5	0,1	2,25	0,42	0,5	0,1	37,93	37,35
0,5	0,5	0,60	0,33	0,5	0,5	27,48	27,43
0,5	1	0,31	0,23	0,5	1	26,17	26,16
0,5	2	0,15	0,13	0,5	2	25,57	25,57
0,5	3	0,10	0,09	0,5	3	25,37	25,37
1	0,1	4,49	0,84	1	0,1	76,72	74,39
1	0,5	1,20	0,67	1	0,5	34,91	34,71
1	1	0,61	0,46	1	1	29,84	29,79
1	2	0,31	0,27	1	2	27,35	27,34
1	3	0,21	0,19	1	3	26,49	26,48
2	0,1	8,98	1,69	2	0,1	232,14	222,80
2	0,5	2,39	1,34	2	0,5	64,88	64,08
2	1	1,22	0,92	2	1	44,50	44,27
2	2	0,62	0,54	2	2	34,42	34,36
2	3	0,41	0,38	2	3	31,16	31,14
5	0,1	22,45	4,21	5	0,1	1319,95	1261,58
5	0,5	5,98	3,35	5	0,5	274,60	269,56
5	1	3,06	2,30	5	1	147,03	145,59
5	2	1,54	1,35	5	2	84,30	83,94
5	3	1,03	0,94	5	3	63,76	63,59
10	0,1	44,90	8,43	10	0,1	5204,79	4971,34
10	0,5	11,97	6,69	10	0,5	1023,39	1003,24
10	1	6,12	4,61	10	1	513,12	507,35
10	2	3,08	2,70	10	2	262,21	260,76
10	3	2,06	1,89	10	3	180,24	179,57

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 32 – Resultados para o estudo de caso 1 com espessura de trilha de 0,070mm (2Oz)

Densidade fluxo (mT)				Temperatura (°C)			
I (A)	l_trilha (mm)	Ponto 1	Ponto 2	I (A)	l_trilha (mm)	Ponto 1	Ponto 2
0,005	0,1	0,02	0,00	0,005	0,1	25,00	25,00
0,005	0,5	0,01	0,00	0,005	0,5	25,00	25,00
0,005	1	0,00	0,00	0,005	1	25,00	25,00
0,005	2	0,00	0,00	0,005	2	25,00	25,00
0,005	3	0,00	0,00	0,005	3	25,00	25,00
0,05	0,1	0,19	0,04	0,05	0,1	25,06	25,06
0,05	0,5	0,06	0,03	0,05	0,5	25,01	25,01
0,05	1	0,03	0,02	0,05	1	25,01	25,01
0,05	2	0,02	0,01	0,05	2	25,00	25,00
0,05	3	0,01	0,01	0,05	3	25,00	25,00
0,5	0,1	1,91	0,41	0,5	0,1	31,34	31,11
0,5	0,5	0,56	0,31	0,5	0,5	26,19	26,17
0,5	1	0,30	0,22	0,5	1	25,58	25,58
0,5	2	0,15	0,13	0,5	2	25,28	25,28
0,5	3	0,10	0,09	0,5	3	25,19	25,19
1	0,1	3,82	0,82	1	0,1	50,52	49,60
1	0,5	1,12	0,63	1	0,5	29,92	29,83
1	1	0,60	0,45	1	1	27,41	27,39
1	2	0,31	0,27	1	2	26,14	26,13
1	3	0,20	0,19	1	3	25,74	25,74
2	0,1	7,64	1,63	2	0,1	127,20	123,53
2	0,5	2,25	1,26	2	0,5	44,80	44,46
2	1	1,19	0,89	2	1	34,65	34,54
2	2	0,61	0,53	2	2	29,70	29,67
2	3	0,41	0,38	2	3	28,07	28,06
5	0,1	19,11	4,08	5	0,1	663,73	640,83
5	0,5	5,61	3,15	5	0,5	148,88	146,77
5	1	2,98	2,23	5	1	85,77	85,11
5	2	1,53	1,33	5	2	54,53	54,37
5	3	1,02	0,94	5	3	44,34	44,26
10	0,1	38,22	8,16	10	0,1	2580,58	2488,93
10	0,5	11,23	6,29	10	0,5	520,51	512,10
10	1	5,97	4,47	10	1	268,07	265,45
10	2	3,05	2,67	10	2	143,29	142,61
10	3	2,05	1,88	10	3	102,45	102,13

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 33 – Resultados para o estudo de caso 1 com espessura de trilha de 0,105mm (3Oz)

Densidade fluxo (mT)				Temperatura (°C)			
I (A)	l_trilha (mm)	Ponto 1	Ponto 2	I (A)	l_trilha (mm)	Ponto 1	Ponto 2
0,005	0,1	0,02	0,00	0,005	0,1	25,00	25,00
0,005	0,5	0,01	0,00	0,005	0,5	25,00	25,00
0,005	1	0,00	0,00	0,005	1	25,00	25,00
0,005	2	0,00	0,00	0,005	2	25,00	25,00
0,005	3	0,00	0,00	0,005	3	25,00	25,00
0,05	0,1	0,16	0,04	0,05	0,1	25,04	25,04
0,05	0,5	0,05	0,03	0,05	0,5	25,01	25,01
0,05	1	0,03	0,02	0,05	1	25,00	25,00
0,05	2	0,02	0,01	0,05	2	25,00	25,00
0,05	3	0,01	0,01	0,05	3	25,00	25,00
0,5	0,1	1,61	0,37	0,5	0,1	29,20	29,06
0,5	0,5	0,54	0,30	0,5	0,5	25,79	25,78
0,5	1	0,29	0,22	0,5	1	25,39	25,38
0,5	2	0,15	0,13	0,5	2	25,19	25,19
0,5	3	0,10	0,09	0,5	3	25,12	25,12
1	0,1	3,22	0,75	1	0,1	41,90	41,36
1	0,5	1,08	0,59	1	0,5	28,27	28,21
1	1	0,58	0,44	1	1	26,55	26,54
1	2	0,30	0,26	1	2	25,76	25,75
1	3	0,20	0,19	1	3	25,49	25,49
2	0,1	6,44	1,50	2	0,1	92,68	90,51
2	0,5	2,17	1,19	2	0,5	38,16	37,94
2	1	1,17	0,87	2	1	31,41	31,35
2	2	0,60	0,53	2	2	28,12	28,10
2	3	0,41	0,37	2	3	27,05	27,04
5	0,1	16,11	3,74	5	0,1	448,02	434,42
5	0,5	5,42	2,97	5	0,5	107,34	106,00
5	1	2,92	2,18	5	1	65,32	64,92
5	2	1,51	1,32	5	2	44,64	44,53
5	3	1,02	0,93	5	3	37,87	37,82
10	0,1	32,22	7,49	10	0,1	1717,53	1663,12
10	0,5	10,83	5,93	10	0,5	354,36	348,99
10	1	5,85	4,37	10	1	186,50	184,89
10	2	3,02	2,64	10	2	103,64	103,21
10	3	2,04	1,87	10	3	76,47	76,26

Fonte: Elaborado pelo autor.

APÊNDICE B – Estudo de Caso 2

Tabela 34 – Resultados para o estudo de caso 2 com espessura de trilha de 0,035mm (10z)

Densidade fluxo (mT)				Temperatura (°C)			
I (A)	l_trilha (mm)	Ponto 1	Ponto 2	I (A)	l_trilha (mm)	Ponto 1	Ponto 2
0,005	0,1	0,02	0,00	0,005	0,1	25,00	25,00
0,005	0,5	0,01	0,00	0,005	0,5	25,00	25,00
0,005	1	0,00	0,00	0,005	1	25,00	25,00
0,005	2	0,00	0,00	0,005	2	25,00	25,00
0,005	3	0,00	0,00	0,005	3	25,00	25,00
0,05	0,1	0,20	0,02	0,05	0,1	25,14	25,11
0,05	0,5	0,06	0,01	0,05	0,5	25,03	25,02
0,05	1	0,03	0,01	0,05	1	25,01	25,01
0,05	2	0,01	0,01	0,05	2	25,01	25,01
0,05	3	0,01	0,01	0,05	3	25,00	25,00
0,5	0,1	1,95	0,15	0,5	0,1	40,18	37,09
0,5	0,5	0,59	0,14	0,5	0,5	27,69	27,36
0,5	1	0,30	0,13	0,5	1	26,19	26,10
0,5	2	0,15	0,09	0,5	2	25,56	25,54
0,5	3	0,10	0,07	0,5	3	25,36	25,35
1	0,1	3,91	0,30	1	0,1	86,05	73,64
1	0,5	1,17	0,29	1	0,5	35,98	34,63
1	1	0,60	0,26	1	1	30,10	29,69
1	2	0,29	0,19	1	2	27,41	27,30
1	3	0,19	0,14	1	3	26,56	26,51
2	0,1	7,81	0,61	2	0,1	269,34	219,86
2	0,5	2,35	0,57	2	0,5	69,15	63,75
2	1	1,19	0,51	2	1	45,91	44,22
2	2	0,59	0,38	2	2	34,84	34,38
2	3	0,38	0,29	2	3	31,36	31,16
5	0,1	19,53	1,51	5	0,1	1543,97	1242,91
5	0,5	5,86	1,43	5	0,5	301,23	267,55
5	1	2,98	1,28	5	1	155,90	145,30
5	2	1,47	0,95	5	2	86,87	83,98
5	3	0,96	0,72	5	3	64,98	63,69
10	0,1	39,06	3,03	10	0,1	6100,59	4896,48
10	0,5	11,73	2,87	10	0,5	1128,61	995,36
10	1	5,96	2,56	10	1	548,61	506,36
10	2	2,94	1,90	10	2	272,86	261,30
10	3	1,92	1,44	10	3	185,19	180,02

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 35 – Resultados para o estudo de caso 2 com espessura de trilha de 0,070mm (2Oz)

Densidade fluxo (mT)				Temperatura (°C)			
I (A)	l_trilha (mm)	Ponto 1	Ponto 2	I (A)	l_trilha (mm)	Ponto 1	Ponto 2
0,005	0,1	0,01	0,00	0,005	0,1	25,00	25,00
0,005	0,5	0,01	0,00	0,005	0,5	25,00	25,00
0,005	1	0,00	0,00	0,005	1	25,00	25,00
0,005	2	0,00	0,00	0,005	2	25,00	25,00
0,005	3	0,00	0,00	0,005	3	25,00	25,00
0,05	0,1	0,15	0,01	0,05	0,1	25,07	25,06
0,05	0,5	0,06	0,01	0,05	0,5	25,01	25,01
0,05	1	0,03	0,01	0,05	1	25,01	25,01
0,05	2	0,01	0,01	0,05	2	25,00	25,00
0,05	3	0,01	0,01	0,05	3	25,00	25,00
0,5	0,1	1,49	0,15	0,5	0,1	32,54	31,05
0,5	0,5	0,56	0,14	0,5	0,5	26,25	26,10
0,5	1	0,29	0,13	0,5	1	25,59	25,55
0,5	2	0,14	0,09	0,5	2	25,28	25,27
0,5	3	0,10	0,07	0,5	3	25,18	25,18
1	0,1	2,98	0,29	1	0,1	55,33	49,33
1	0,5	1,11	0,28	1	0,5	30,37	29,72
1	1	0,58	0,25	1	1	27,54	27,34
1	2	0,29	0,19	1	2	26,12	26,07
1	3	0,19	0,14	1	3	25,73	25,70
2	0,1	5,97	0,59	2	0,1	146,39	122,48
2	0,5	2,23	0,56	2	0,5	47,00	44,36
2	1	1,16	0,50	2	1	35,37	34,54
2	2	0,58	0,37	2	2	29,81	29,59
2	3	0,38	0,29	2	3	28,10	28,00
5	0,1	14,92	1,47	5	0,1	779,47	634,16
5	0,5	5,56	1,41	5	0,5	162,67	146,21
5	1	2,91	1,25	5	1	90,14	84,94
5	2	1,45	0,93	5	2	55,82	54,39
5	3	0,95	0,71	5	3	44,89	44,25
10	0,1	29,85	2,95	10	0,1	3026,28	2459,96
10	0,5	11,13	2,82	10	0,5	575,01	509,90
10	1	5,82	2,51	10	1	285,88	265,10
10	2	2,90	1,87	10	2	148,45	142,76
10	3	1,90	1,43	10	3	104,69	102,15

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 36 – Resultados para o estudo de caso 2 com espessura de trilha de 0,105mm (3Oz)

Densidade fluxo (mT)				Temperatura (°C)			
I (A)	l_trilha (mm)	Ponto 1	Ponto 2	I0 (A)	l_trilha (mm)	Ponto 1	Ponto 2
0,005	0,1	0,01	0,00	0,005	0,1	25,00	25,00
0,005	0,5	0,01	0,00	0,005	0,5	25,00	25,00
0,005	1	0,00	0,00	0,005	1	25,00	25,00
0,005	2	0,00	0,00	0,005	2	25,00	25,00
0,005	3	0,00	0,00	0,005	3	25,00	25,00
0,05	0,1	0,15	0,01	0,05	0,1	25,05	25,04
0,05	0,5	0,05	0,01	0,05	0,5	25,01	25,01
0,05	1	0,03	0,01	0,05	1	25,00	25,00
0,05	2	0,01	0,01	0,05	2	25,00	25,00
0,05	3	0,01	0,01	0,05	3	25,00	25,00
0,5	0,1	1,45	0,14	0,5	0,1	29,90	28,95
0,5	0,5	0,53	0,14	0,5	0,5	25,83	25,73
0,5	1	0,28	0,12	0,5	1	25,39	25,36
0,5	2	0,14	0,09	0,5	2	25,19	25,18
0,5	3	0,09	0,07	0,5	3	25,12	25,12
1	0,1	2,90	0,29	1	0,1	44,98	41,12
1	0,5	1,06	0,27	1	0,5	28,56	28,14
1	1	0,57	0,24	1	1	26,69	26,56
1	2	0,29	0,18	1	2	25,75	25,71
1	3	0,19	0,14	1	3	25,48	25,47
2	0,1	5,81	0,57	2	0,1	105,30	89,85
2	0,5	2,11	0,55	2	0,5	39,53	37,81
2	1	1,13	0,49	2	1	31,89	31,35
2	2	0,57	0,37	2	2	28,19	28,05
2	3	0,38	0,28	2	3	27,06	26,99
5	0,1	14,52	1,43	5	0,1	524,78	430,73
5	0,5	5,29	1,37	5	0,5	116,47	105,66
5	1	2,84	1,22	5	1	68,28	64,88
5	2	1,43	0,92	5	2	45,47	44,53
5	3	0,94	0,70	5	3	38,12	37,71
10	0,1	29,03	2,86	10	0,1	2005,18	1646,67
10	0,5	10,57	2,73	10	0,5	390,24	347,51
10	1	5,67	2,44	10	1	198,31	184,77
10	2	2,86	1,84	10	2	107,01	103,26
10	3	1,88	1,41	10	3	77,79	76,11

Fonte: Elaborado pelo autor.

APÊNDICE C – Estudo de Caso 3

Tabela 37 – Resultados para o estudo de caso 3

Densidade fluxo					Temperatura				
I (A)	t _{sup} (mm)	t _{inf} (mm)	Ponto 1 (mT)	Ponto 2 (mT)	I (A)	t _{sup} (mm)	t _{inf} (mm)	Ponto 1 (°C)	Ponto 2 (°C)
1	0,1	1	0,60	0,25	1	0,1	1	27,54	27,33
1	0,1	2	0,29	0,19	1	0,1	2	26,12	26,07
1	0,1	3	0,19	0,14	1	0,1	3	25,73	25,70
1	0,5	1	0,60	0,25	1	0,5	1	27,54	27,33
1	0,5	2	0,29	0,19	1	0,5	2	26,12	26,07
1	0,5	3	0,19	0,14	1	0,5	3	25,73	25,70
1	1	1	0,60	0,25	1	1	1	27,53	27,32
1	1	2	0,29	0,19	1	1	2	26,12	26,07
1	1	3	0,19	0,14	1	1	3	25,73	25,70
5	0,1	1	2,98	1,24	5	0,1	1	90,10	84,84
5	0,1	2	1,47	0,93	5	0,1	2	55,80	54,34
5	0,1	3	0,96	0,71	5	0,1	3	44,89	44,22
5	0,5	1	2,98	1,24	5	0,5	1	90,07	84,74
5	0,5	2	1,47	0,93	5	0,5	2	55,79	54,32
5	0,5	3	0,96	0,71	5	0,5	3	44,88	44,21
5	1	1	2,98	1,24	5	1	1	89,96	84,47
5	1	2	1,47	0,93	5	1	2	55,77	54,27
5	1	3	0,96	0,71	5	1	3	44,87	44,19
10	0,1	1	5,97	2,48	10	0,1	1	285,70	264,72
10	0,1	2	2,94	1,86	10	0,1	2	148,39	142,57
10	0,1	3	1,92	1,42	10	0,1	3	104,67	102,03
10	0,5	1	5,97	2,48	10	0,5	1	285,60	264,34
10	0,5	2	2,94	1,86	10	0,5	2	148,36	142,45
10	0,5	3	1,92	1,42	10	0,5	3	104,66	101,96
10	1	1	5,97	2,48	10	1	1	285,14	263,25
10	1	2	2,94	1,86	10	1	2	148,25	142,28
10	1	3	1,92	1,42	10	1	3	104,61	101,90

Fonte: Elaborado pelo autor.

APÊNDICE D – Estudo de Caso 4

Tabela 38 – Resultados para o estudo de caso 4

Densidade fluxo					Temperatura				
I (A)	Dist. (mm)	r (mm)	Ponto 1 (mT)	Ponto 2 (mT)	I (A)	Dist. (mm)	r (mm)	Ponto 1 (°C)	Ponto 2 (°C)
0,005	0,03	0,0125	0,07	0,03	0,005	0,03	0,0125	25,01	25,01
0,005	0,03	0,025	0,04	0,03	0,005	0,03	0,025	25,00	25,00
0,005	0,05	0,0125	0,06	0,02	0,005	0,05	0,0125	25,01	25,01
0,005	0,05	0,025	0,04	0,02	0,005	0,05	0,025	25,00	25,00
0,005	0,1	0,0125	0,08	0,01	0,005	0,1	0,0125	25,01	25,01
0,005	0,1	0,025	0,04	0,01	0,005	0,1	0,025	25,00	25,00
0,05	0,03	0,0125	0,68	0,34	0,05	0,03	0,0125	26,33	26,30
0,05	0,03	0,025	0,37	0,33	0,05	0,03	0,025	25,29	25,29
0,05	0,05	0,0125	0,64	0,20	0,05	0,05	0,0125	26,33	26,29
0,05	0,05	0,025	0,41	0,20	0,05	0,05	0,025	25,30	25,29
0,05	0,1	0,0125	0,75	0,10	0,05	0,1	0,0125	26,33	26,27
0,05	0,1	0,025	0,43	0,10	0,05	0,1	0,025	25,30	25,29
0,5	0,03	0,0125	6,80	3,43	0,5	0,03	0,0125	163,45	160,79
0,5	0,03	0,025	3,73	3,34	0,5	0,03	0,025	55,62	55,50
0,5	0,05	0,0125	6,38	2,02	0,5	0,05	0,0125	163,44	159,01
0,5	0,05	0,025	4,05	2,04	0,5	0,05	0,025	55,77	55,31
0,5	0,1	0,0125	7,51	0,99	0,5	0,1	0,0125	163,43	157,03
0,5	0,1	0,025	4,31	0,97	0,5	0,1	0,025	55,91	54,99
1	0,03	0,0125	13,60	6,85	1	0,03	0,0125	578,78	568,15
1	0,03	0,025	7,46	6,68	1	0,03	0,025	147,62	147,14
1	0,05	0,0125	12,76	4,04	1	0,05	0,0125	578,75	561,05
1	0,05	0,025	8,10	4,08	1	0,05	0,025	148,22	146,39
1	0,1	0,0125	15,02	1,99	1	0,1	0,0125	578,73	553,13
1	0,1	0,025	8,63	1,94	1	0,1	0,025	148,82	145,13

Fonte: Elaborado pelo autor.

APÊNDICE E – Estudo de Caso 5

Tabela 39 – Resultados para o estudo de caso 5

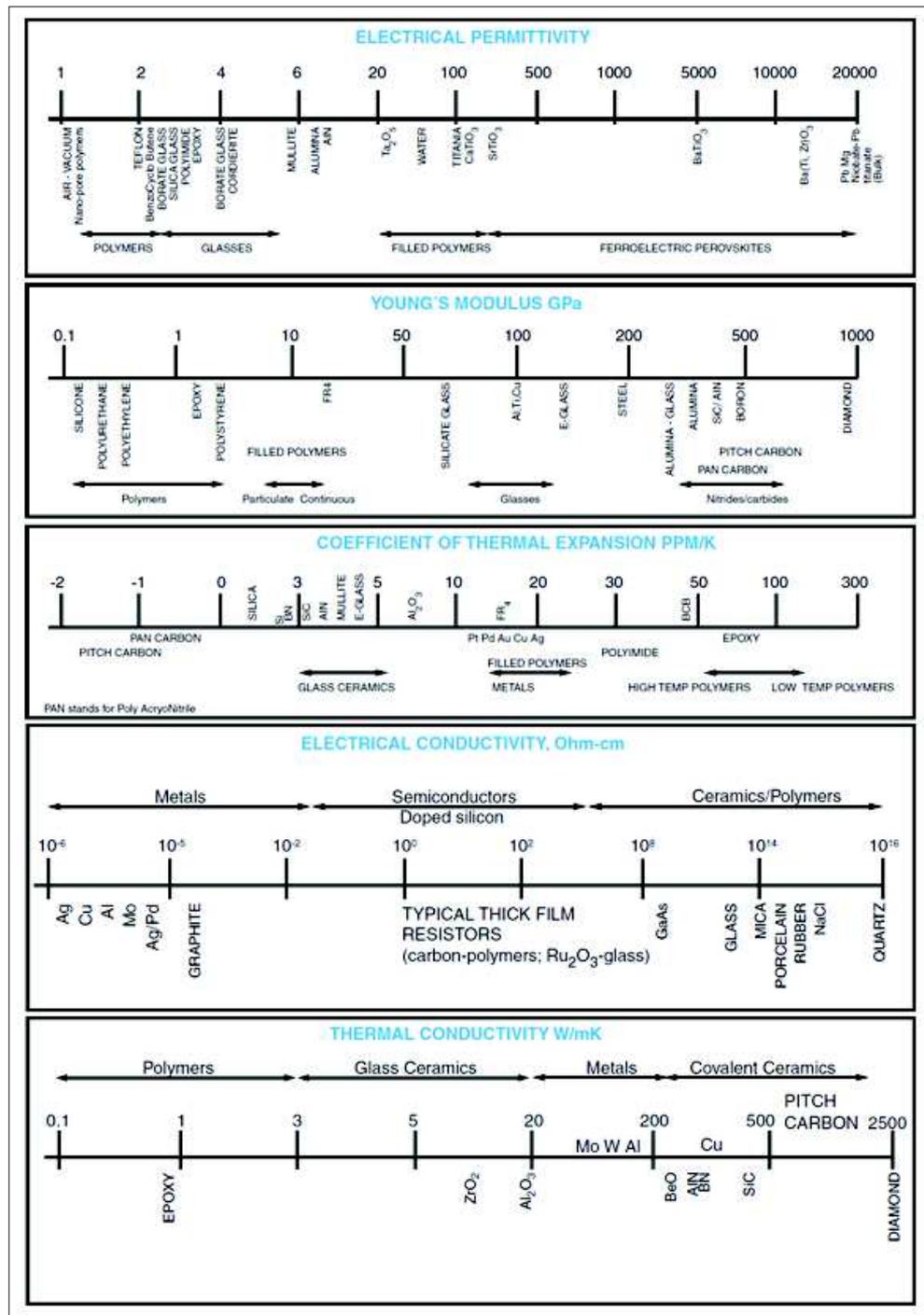
I (A)	Densidade fluxo (mT)			Temperatura (°C)		
	Dist. (mm)	Ponto 1	Ponto 2	Dist. (mm)	Ponto 1	Ponto 2
10	0,1	0,74	0,57	0,1	100	86,22
100	0,1	7,44	5,74			
200	0,1	14,88	11,47			
10	0,3	0,67	0,52	0,3	100	77,32
100	0,3	6,72	5,22			
200	0,3	13,43	10,43			
10	0,5	0,61	0,48	0,5	100	70,86
100	0,5	6,09	4,77			
200	0,5	12,17	9,54			
10	1	0,48	0,38	1	100	59,37
100	1	4,78	3,81			
200	1	9,56	7,63			

Fonte: Elaborado pelo autor.

Anexos

ANEXO A – MATERIAIS E SUAS CARACTERÍSTICAS

Figura 62 – Materiais e suas principais características



Fonte: Tummala (2001).