

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E
ELETRÔNICA**

Davi Luciano Figueiredo

**CARACTERIZAÇÃO ESTÁTICA DE SENSORES
MAGNETORRESISTIVOS: AMR, GMR, MTJ**

Florianópolis
22 de Fevereiro de 2016

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Figueiredo, Davi

CARACTERIZAÇÃO ESTÁTICA DE SENSORES MAGNETORRESISTIVOS:
AMR, GMR, MTJ / Davi Figueiredo ; orientador, Márcio
Cherem Schneider ; coorientador, Murilo Pilon Pessatti. -
Florianópolis, SC, 2016.

61 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico.
Graduação em Engenharia Eletrônica.

Inclui referências

1. Engenharia Eletrônica. 2. MTJ, AMR, GMR, TME. 3.
magnetorresistência, magnetorreistores, sensores
magnéticos. 4. caracterização estática. I. Cherem
Schneider, Márcio. II. Pilon Pessatti, Murilo. III.
Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em
Engenharia Eletrônica. IV. Título.

**CARACTERIZAÇÃO ESTÁTICA DE SENSORES
MAGNETORRESISTIVOS: AMR, GMR, MTJ**

Davi Luciano Figueiredo

*Esta monografia foi julgada no contexto da disciplina
EEL7806: Projeto Final TCC
e aprovada na sua forma final pelo
Curso de Engenharia Eletrônica*

Prof. Márcio Cherem Schneider, PhD

Assinatura do orientador

Banca examinadora:

Prof. Carlos Renato Rambo, PhD
EEL-UFSC

Prof. Carlos Galup Montoro, PhD
EEL-UFSC

Murilo Pilon Pessatti, MSc
Chipus Microelectronics CEO

AGRADECIMENTOS

Ao único Deus vivo, que nunca me desamparou, que por sua misericórdia e graça me capacitou.

Ao meu Senhor e Salvador Jesus Cristo são destinados todos os meus agradecimentos.

RESUMO

A possibilidade de medir uma série de parâmetros físicos através do sensoriamento da intensidade e da orientação de campos magnéticos, fez com que muitas tecnologias de sensores magnéticos fossem descobertas e desenvolvidas. A mais recente delas, baseia-se no efeito de magnetorresistência de tunelamento, que ocorre entre camadas de materiais ferromagnéticos, e é chamada MTJ. Nesta dissertação, são apresentadas a caracterização e a análise DC de uma nova série de sensores MTJ e, posteriormente, um modelo funcional que descreve seu comportamento é implementado. Com o objetivo de facilitar a interpretação e a análise dos dados obtidos, outras duas tecnologias de sensores magnetorresistivos também foram caracterizadas, a AMR e a GMR. Foi necessário confeccionar uma placa de circuito impresso para que a caracterização dos sensores fosse realizada dentro das mesmas condições de contorno. Na placa, foram soldados fios condutores de corrente próximos aos sensores, os quais eram responsáveis por gerar campos magnéticos constantes sobre cada um deles. Deste modo, foi possível submeter os circuitos a uma série de testes e realizar a extração de diversos parâmetros, tais como: Sensibilidade, linearidade, histerese, resolução, precisão, e outros. Os resultados obtidos nos testes mostraram que todas as tecnologias apresentam vantagens e desvantagens e que nenhuma delas pode ser descartada. Em relação ao MTJ, foi possível observar que ele apresenta comportamento igual ou superior as outras tecnologias em termos de sensibilidade, faixa de operação, histerese e consumo de potência. Sua maior desvantagem é o alto nível de ruído apresentado em baixas frequências, que foi evidenciado pela degradação que causou na resolução e na precisão do sensor.

ABSTRACT

The possibility of measuring a wide variety of physical parameters through the sensing of the strength and direction of magnetic fields led to the discovery and development of many technologies of magnetic sensors. The latest is based on the tunneling magnetoresistance effect that happens between thin-film ferromagnetic layers and is known as MTJ. This thesis presents the direct current(DC) analyses and characterization of a new series of MTJ sensors and it also implements a functional model of the behaviour of MTJ. In order to ease the interpretation and analysis of the acquired data, two other magnetoresistive sensor technologies, known as AMR and GMR, were also characterized. It was necessary to develop a printed circuit board as a means to make the characterization of the sensors within the same boundary conditions. On the board, current carrying wires were soldered next to the sensors so that they could work as a source of constant magnetic fields. Therefore, it was possible to extract several parameters, such as: sensitivity, linearity, hysteresis, resolution, accuracy and others. The results obtained through the tests showed that all the three technologies present some advantages and disadvantages and none of them can be discarded. In regard to the MTJ, it was possible to observe that it performed better than the other technologies in terms of sensitivity, operation range, hysteresis and power consumption. Its worst disadvantage is the high noise level presented at low frequencies, and that was evidenced by the damage caused in the resolution and accuracy of the sensor.

Conteúdo

1	Introdução	1
1.1	Objetivos	3
1.1.1	Objetivos gerais	3
1.1.2	Objetivos específicos	4
2	Fundamentação teórica	5
2.1	Análise de mercado	5
2.2	Magnetismo dos materiais	7
2.3	Classificação dos materiais magnéticos	10
2.3.1	Materiais diamagnéticos	12
2.3.2	Materiais paramagnéticos	12
2.3.3	Materiais ferromagnéticos	14
2.3.4	Materiais ferrimagnéticos	16
2.3.5	Materiais antiferromagnéticos	17
2.4	Efeitos de magnetorresistência	18
2.4.1	Magnetoresistência ordinária(OMR)	19
2.4.2	Magnetorresistência anisotrópica(AMR)	20
2.4.3	Magnetorresistência gigante(GMR)	22
2.4.4	Magnetorresistência de tunelamento(TMR)	25
3	Materiais e métodos	28
3.1	Materiais	28
3.2	Descrição dos sensores	28
3.2.1	AMR - HMC1022TR	28
3.2.2	GMR - AA00302	29
3.2.3	MTJ - ADIR	30
3.3	Descrição dos instrumentos	32
3.4	Metodologia	33
3.4.1	Projeto e confecção da PCI	33

3.4.2	Caracterização dos sensores e descrição dos testes . . .	35
3.4.3	Análise de dados e modelo funcional	37
4	Testes e extração de parâmetros	38
4.1	Condições de contorno	38
4.2	Extração de parâmetros	39
4.2.1	Característica tensão corrente	39
4.2.2	Sensibilidade	41
4.2.3	Linearidade	42
4.2.4	Precisão	42
4.2.5	Resolução	44
4.2.6	Histerese	46
4.2.7	Coeficiente de temperatura	48
5	Análise dos resultados	51
6	Modelo funcional	53
6.1	Descrição comportamental	53
6.2	Resultados e comparações	53
7	Conclusão	57

Lista de Figuras

2.1	Ilustração referente a uma análise do mercado de sensores magnéticos	6
2.2	(a) Dipolo magnético produzido pelo movimento orbital do elétron; (b) Dipólo magnético produzido pelo "spin"do elétron. . .	11
2.3	Comportamento dos dipolos de um material paramagnético . .	13
2.4	Caraterísticas de materiais paramagnéticos: (a) Variação da magnetização com o Campo; (b) Variação do inverso da susceptibilidade com a temperatura.	14
2.5	Comportamento dos domínios de dipolo de um material ferromagnético	15
2.6	Curva de variação da magnetização espontânea de materiais ferromagnéticos em função da temperatura	16
2.7	Comportamento dos domínios de dipolo de um material ferromagnético	17
2.8	Comportamento dos domínios de dipolo de um material anti-ferromagnético	18
2.9	Ilustração do efeito AMR quando: (a) Magnetização é paralela a corrente (b) magnetização é perpendicular a corrente e (c) Variação da resistência em função do ângulo formado entre a corrente e a magnetização	20
2.10	(a) Estrutura "barber-pole"de placas metalicas que restringem a corrente a fluir à 45° da posição de repouso da magnetização (b) Variação da resitência em relação ao campo para um dispositivo AMR "barber-pole"	21
2.11	Ilustração de uma estrutura GMR (a) Na ausência de campo magnético, com alinhamento antiparalelo de magnetização e alto espalhamento (b) Na presença de campo magnético, com alinhamento paralelo de magnetização e baixo espalhamento .	23

2.12	Representações gráficas da variação da resistência e da magnetização com o campo magnético em uma estrutura MRG ideal	24
2.13	Ilustração de uma spin-valve	25
2.14	Ilustração gráfica e física da variação da resistência com o campo magnético em uma estrutura MTJ	26
3.1	Ilustração do sensor HMC1022:(a) Pinagem do package; (b) Diagrama do bloco funcional Fonte: Datasheet [24]	29
3.2	Ilustração do sensor AA00302:(a) Pinagem do package; (b) Diagrama do bloco funcional	30
3.3	Curva típica de variação de resistência de um sensor MTJ-ADIR	31
3.4	Ilustração do sensor ADIR: (a) Pinagem do package; (b) Diagrama do bloco funcional	32
3.5	Esquemático da PCI	34
3.6	Leiaute da PCI	34
3.7	PCI concluída	35
4.1	Característica tensão corrente do sensor MTJ	39
4.2	Característica tensão corrente do sensor AMR	40
4.3	Característica tensão corrente do sensor GMR	40
4.4	Característica tensão-corrente dos sensores AMR, GMR e MTJ	41
4.5	Gráfico de repetibilidade para determinar a precisão do sensor MTJ	43
4.6	Gráfico de repetibilidade para determinar a precisão do sensor GMR	43
4.7	Gráfico de repetibilidade para determinar a precisão do sensor AMR	44
4.8	Resolução do sensor MTJ	45
4.9	Resolução do sensor AMR	45
4.10	Resolução do sensor GMR	46
4.11	Histerese do sensor GMR	47
4.12	Histerese do sensor MTJ	47
4.13	Histerese do sensor AMR	48

4.14	Curvas de comportamento do sensor GMR mediante à variação da temperatura.	49
4.15	Curvas de comportamento do sensor MTJ mediante à variação da temperatura.	50
4.16	Curvas de comportamento do sensor AMR mediante à variação da temperatura.	50
6.1	Descrição comportamental do MTJ em verilogA	54
6.2	Testbench de simulação do modelo elaborado para o MTJ . . .	55
6.3	Curvas tensão-corrente do modelo MTJ variando a temperatura	56

Lista de Tabelas

2.1	Unidades das grandezas magnéticas relevantes a este trabalho, nos Sistemas Internacional (SI) e Gaussiano (CGS)	10
2.2	Características dos principais tipos de comportamentos magnéticos	11
5.1	Análise dos resultados obtidos para a faixa de corrente de -1 a 1 A	51

Capítulo 1

Introdução

O magnetismo foi o primeiro fenômeno a despertar a curiosidade do homem em relação à estrutura interna dos materiais. Os primeiros registros a relatarem forças de atração e repulsão entre magnetitas foram deixados na Europa, por Thales Mileto, cerca de 600 a.C. Posteriormente, os chineses inventaram a bússola, que foi a primeira aplicação prática deste fenômeno. Baseada na propriedade que uma agulha magnetizada tem de detectar o campo magnético da terra e orientar-se em direção a ele, a bússola é também considerada o primeiro sensor magnético criado pelo homem. A partir do ano de 1200, quando se intensificaram as atividades de navegação e exploração dos mares, este aparato ganhou visibilidade e sua importância aumentou significativamente [2].

Em 1820, Oersted descobriu que um filamento carregando corrente também era capaz de alterar a orientação da agulha em sua proximidade. Biot-Savart é responsável por formular o primeiro modelo matemático descrevendo a correlação que há entre corrente elétrica e campo magnético. A partir disto, dá-se início à era do magnetismo, Gauss e Weber construíram o primeiro magnetômetro bifilar e bússolas muito mais potentes passaram a ser desenvolvidas [20].

Uma simples análise da história desse tema evidencia que a disponibilidade de diferentes tipos de sensores magnéticos está intimamente ligada à disponibilidade de novas classes de materiais, à descoberta de novos fenômenos magnéticos e à compreensão de como esses materiais se comportam e interagem entre si. Existe uma série de efeitos magnéticos que, quando descobertos, levaram ao desenvolvimento de um novo sensor, alguns deles são: Efeito Matteucci, que levou ao desenvolvimento dos sen-

sos magnetoeelásticos; Efeito Hall, que levou ao desenvolvimento dos sensores magnetogalvânicos; Efeito Josephson, que levou ao desenvolvimento dos sensores SQUID; finalmente, o efeito Thomsom, popularmente conhecido como efeito de magnetorresistência, que levou ao desenvolvimento de diferentes tecnologias de sensores magnetorresistivos [2], [22].

Atualmente, as tecnologias de transdutores magnéticos enumeradas acima são extensivamente utilizadas na indústria e no desenvolvimento de dispositivos eletrônicos. Comercialmente falando, dentre as tecnologias de transdutores magnetorresistivos hoje mais bem consolidadas no mercado, destacam-se: Efeito Hall, magnetorresistência anisotrópica (AMR, do inglês anisotropic magnetic resistance), magnetorresistência gigante (GMR, do inglês giant magnetic resistance) e, mais recentemente, a magnetorresistência de tunelamento (TMR, do inglês tunneling magnetic resistance).

Os sensores de efeito Hall são os mais utilizados até hoje; no entanto, não são recomendados para detecção de campos magnéticos fracos, pois apresentam uma sensibilidade muito baixa, sendo necessário o uso de concentradores de fluxo magnético para que possam realizar esta função. Estes concentradores aumentam o tamanho, o consumo, o peso e o custo do sensor e por isto, essa tecnologia vem sendo gradativamente substituída por uma das outras três mencionadas anteriormente. Os sensores AMR apresentam uma sensibilidade muito maior do que os sensores de efeito Hall. Porém, sua faixa linear de operação é muito pequena e geralmente fazem-se necessárias bobinas para reiniciar seu funcionamento, gerando um aumento na complexidade, no preço, e no consumo de potência destes sensores. A tecnologia de sensores GMR, que surgiu devido aos avanços nas técnicas de deposição de filmes finos, apresenta uma sensibilidade ainda maior que a AMR, porém, para diversas aplicações, sua faixa linear de operação é ainda considerada muito pequena.

Os avanços na compreensão física do mecanismo de funcionamento da tecnologia GMR culminaram no desenvolvimento da tecnologia TMR, popularmente conhecida como MTJ (do inglês, magnetic tunneling junction). Nos últimos dez anos, essa tecnologia vem conquistando seu espaço na indústria por oferecer maior faixa de operação linear e também, uma variação de

resistência muito maior que as demais. Recentemente, uma empresa norte americana, produtora de sensores magnéticos do tipo MTJ, firmou uma parceria com a Chipus Microelectronics. O objetivo desta união é de que ambas as empresas possam trabalhar juntas na caracterização e no desenvolvimento de aplicações para uma versão de sensores MTJ recentemente desenvolvida.

Este trabalho de conclusão de curso foi proposto pela Chipus e é um fruto dessa parceria. Seus principais objetivos são realizar a parte DC da caracterização dos sensores MTJ, obter os dados comportamentais mais relevantes da tecnologia e desenvolver um modelo funcional para estes dispositivos. Além do MTJ, dois outros chips também serão caracterizados, um representando a tecnologia AMR e outro a GMR. Assim, será possível fazer comparativos entre as tecnologias, apresentando as vantagens e desvantagens de cada uma delas.

Para realizar estas caracterizações, uma única placa de circuito impresso (PCI) será confeccionada; nela o MTJ será soldado junto dos outros dois sensores, de forma que todos utilizem a mesma instrumentação e sejam submetidos as mesmas condições de teste. Por se tratar de uma tecnologia nova que ainda não está disponível no mercado e que pouco se sabe a respeito, os resultados obtidos neste trabalho serão de grande relevância, não só comercial mas também acadêmica. Dentro de determinadas condições de contorno, será possível obter uma série de conclusões qualitativas e quantitativas a respeito dessa nova versão de sensores MTJ. Essas conclusões poderão servir de base a muitos outros trabalhos e facilitarão a inserção destes dispositivos nos projetos de circuitos integrados realizados pela Chipus.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivos gerais

Desenvolver uma placa de circuito impresso (PCI), na qual será realizada uma jiga de testes para caracterização DC das três mais promissoras

tecnologias de sensores magnetorresistivos. O intuito da caracterização é comparar o desempenho de uma nova versão de sensores MTJ com os líderes de mercado AMR e GMR. Finalmente, gerar um modelo funcional do MTJ para ser utilizado no projeto de circuitos integrados.

1.1.2 Objetivos específicos

Para alcançar o objetivo geral deste trabalho, os objetivos específicos que estão listados abaixo em ordem cronológica deverão ser realizados:

- Estudar os sensores magnéticos de modo geral, a fim de compreender o mecanismo básico de sensoriamento de cada uma das tecnologias magnetorresistivas a ser caracterizada,
- Analisar as vantagens e desvantagens apresentadas por cada uma delas,
- Selecionar e comprar um chip de cada tecnologia, o qual deverá apresentar alta performance e ser líder de mercado,
- Confeccionar uma PCI para realizar a caracterização dos três sensores nas mesmas condições de temperatura, pressão, tensão, faixa de corrente e etc,
- Caracterizar os sensores quanto a sensibilidade, linearidade, precisão, resolução, histerese e coeficiente de temperatura.
- Gerar um modelo funcional do MTJ que possibilite sua utilização em projeto de circuitos integrados.

Capítulo 2

Fundamentação teórica

2.1 Análise de mercado

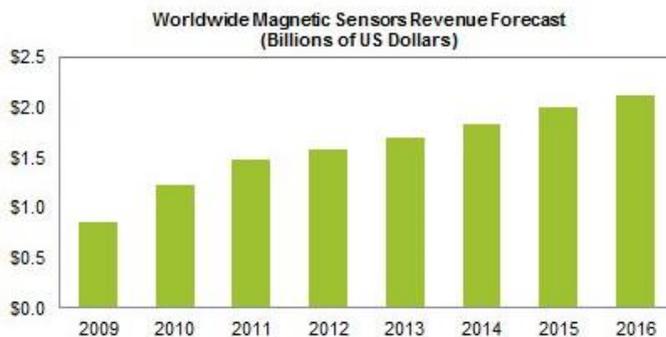
Há menos de um século atrás, sensores magnéticos eram utilizados quase que exclusivamente para constatação de direção. Bússolas de alta precisão podiam ser construídas graças à capacidade que as agulhas magnéticas apresentavam de detectar os pólos da terra. O mercado não era muito diversificado e esses dispositivos encontravam sua maior aplicabilidade na indústria de navegação.

O avanço das pesquisas nesse setor possibilitou que, através do sensoriamento da intensidade e da orientação de campos magnéticos, os sensores passassem a realizar medições de diversos parâmetros físicos, tais como: posição, ângulo, velocidade, torque, corrente elétrica e logicamente, campo magnético (seja ele gerado por um ímã permanente, por um material magnético mole, ou até mesmo por um filamento de corrente). Em decorrência disso, o número de aplicações destes sensores tem aumentado significativamente nas últimas décadas. O que anteriormente era um simples item de segurança utilizado em navios, passou a estar presente na grande maioria dos setores da indústria, oferecendo não somente segurança, mas também autonomia, praticidade e conforto.

Levando em consideração a grande versatilidade desses sensores, o avanço desenfreado das tecnologias relacionadas e a recente e contínua miniaturização dos dispositivos, é possível prever que a demanda por sensores magnéticos tende a continuar aumentando. De fato, de acordo com o último relatório, postado em outubro de 2015 por um jornal internacional de transparência de mercado [6], o mercado dos sensores de campo magné-

tico foi avaliado em 2 bilhões de dólares em 2014(figura 2.1), e a estimativa é que venha a valer 3,5 bilhões até o ano de 2021, apresentando uma taxa de crescimento anual de 8,3% durante o período da previsão.

Com o intuito facilitar a interpretação dos dados obtidos nesta pesquisa, o jornal segmentou o mercado de sensores magnéticos quanto ao seu tipo. Nessa segmentação são apresentadas as seguintes categorias: Sensores de efeito Hall, sensores fluxgate, sensores SQUID, sensores magnetorresistivos e outros. Assim, é possível observar a relevância dos magnetorresistores dentro deste mercado. Em 2014 os sensores de efeito Hall dominaram as vendas, e foram os responsáveis pela parte mais substancial das movimentações deste mercado. Isso se deve ao seu alto índice de aceitação e sua vasta área de atuação, que vai desde eletrônicos de consumo até aplicações de automação industrial. No entanto, o resumo dessa análise retrata também que os sensores magnetorresistivos, principalmente os baseados nas tecnologias GMR e TMR, estão ganhando cada vez mais visibilidade e a expectativa é que, dentro de poucos anos, se tornem os carros chefe deste mercado [6].



Source: IHS iSuppli Research.

Figura 2.1: Ilustração referente a uma análise do mercado de sensores magnéticos

Portanto, fica claro que o mercado de magnetorresistores está ainda em seu período de maturação. Há muito a ser estudado, desenvolvido e fabri-

cado. Por isso, a Chipus acredita ser de extrema importância entrar nessa janela de oportunidade, buscando obter informações mais concretas a respeito do desempenho de cada uma destas tecnologias para que se possa investir com maior segurança.

2.2 Magnetismo dos materiais

Ainda que o enfoque deste trabalho seja a caracterização de sensores magnetorresistivos para análise e modelamento funcional, faz-se necessária uma breve apresentação de alguns conceitos e propriedades básicas, tanto do magnetismo quanto dos materiais magnéticos em geral. O intuito desta breve revisão é facilitar a compreensão do comportamento e das características elétricas dos dispositivos a serem estudados.

Todos materiais possuem características magnéticas, podendo estas serem acentuadas ou não. Basicamente, a maneira que um material se comporta quando exposto a um campo magnético externo é determinada pela origem de seus dipolos magnéticos e pela natureza de suas interações. Esses dipolos são de dimensões nanoscópicas, já que provêm do momentum angular dos elétrons presentes nos íons e/ou átomos do material.

Entretanto, ainda que a maneira pela qual um material responde à incidência de um campo magnético seja determinada pela natureza quântica de sua estrutura molecular, macroscopicamente é possível descrever este comportamento de uma forma mais qualitativa através do **vetor magnetização** M . Este vetor representa o estado magnético de um material como um todo e é definido como momento de dipolo magnético por unidade de volume [2],

$$M = \frac{1}{V} \sum_i \mu_i \quad (2.1)$$

O somatório da equação 2.1 deve ser aplicado sobre todos os pontos i onde hajam dipolos de modelamento μ_i no interior do volume V , levando sempre em consideração que V deve ser escolhido suficientemente grande a fim de obter uma boa média macroscópica, porém pequeno em relação ao tamanho total da amostra para que M represente uma propriedade magné-

tica local [2].

Os campos magnéticos são produzidos por cargas elétricas em movimento (corrente elétrica), podendo ser de origem macroscópica, através do fluxo contínuo de elétrons em um filamento ou, de origem microscópica, associado ao movimento de elétrons em orbitais atômicos de um material. Esses campos podem ser expressos matematicamente por duas grandezas diferentes: O vetor indução magnética B ou o vetor intensidade de campo magnético H .

Esta dupla definição existe porque quando campos magnéticos passam por materiais magnéticos, correntes de magnetização são geradas nos seus interiores, as quais geram seus próprios campos magnéticos que podem influenciar na medida do campo magnético externo. Desta maneira, torna-se difícil diferenciar quais partes do campo são de origem externa e quais tiveram origem no próprio material.

É com o intuito de evitar esse tipo de confusão que existe o vetor intensidade de campo magnético H , o qual é descrito pela seguinte relação,

$$H = \frac{B}{\mu_o} - M \quad (2.2)$$

onde B é a densidade de fluxo magnético no interior do material e M é a magnetização induzida pelo vetor intensidade de campo magnético H que foi aplicado externamente. O coeficiente μ_o é a permeabilidade magnética do vácuo ($\mu_o = 4\pi \times 10^{-7}$).

Portanto, ao utilizar H para designar um campo magnético, avalia-se a influência magnética de campos gerados por correntes externas sobre um dado material, independente de sua resposta magnética, enquanto que utilizando B , avalia-se tanto o campo magnético externo quanto a magnetização do meio. A equação 2.2, quando descrita no sistema centímetro-grama-segundo (CGS), o qual será utilizado neste trabalho, apresenta o seguinte formato,

$$H = B - 4\pi M \quad (2.3)$$

A partir do conhecimento do vetor magnetização M e das diferenças entre os campos magnéticos H e B , torna-se mais fácil compreender o significado da susceptibilidade magnética (χ_m). Esta grandeza expressa a capacidade que um material tem de se magnetizar quando sobre ele houver um campo H incidente. No caso mais simples, a magnetização é induzida na mesma direção do campo aplicado de modo que χ_m é um escalar definido por [2],

$$\chi_m = \frac{M}{H} \tag{2.4}$$

Outra grandeza muito importante neste contexto é a permeabilidade magnética (μ), ela mede o aumento ou a diminuição do campo magnético resultante dentro de um material em relação ao campo magnetizante que incide sobre ele. Em outras palavras, esta grandeza expressa a capacidade de um material em auxiliar a formação de campos magnéticos no seu interior através da razão entre B e H ,

$$\mu = \frac{B}{H} \tag{2.5}$$

Utilizando as equações 2.3 á 2.5 é possível também relacionar a susceptibilidade e a permeabilidade através da seguinte equação,

$$\mu = 1 + 4\pi\chi_m \tag{2.6}$$

Todas as grandezas aqui apresentadas podem, e são comumente confundidas devido à utilização corriqueira de dois diferentes sistemas de unidades. O primeiro é o Sistema Internacional(SI), que utiliza como unidades primárias o metro, o quilograma e o segundo. O outro, é conhecido como CGS, uma vez que utiliza as unidades centímetro, grama e segundo. Para evitar confusão na interpretação do desenvolvimento deste trabalho e das equações já apresentadas, a tabela 2.1 traz as unidades, símbolos, e relações de conversão dos dois sistemas.

Grandeza	Símbolo	Unidade (SI)	Unidade(CGS)	Relação de conversão
Indução magnética	B	tesla(T) = Wb/m^2	gauss(G)	$1T = 10^4G$
Intensidade magnética	H	A/m	oersted(Oe)	$1A/m = 4\pi 10^{-3}Oe$
Magnetização	M	A/m	emu/cm^3	$1A/m = 10^{-3}uem/cm^3$
Permeabilidade no vácuo	μ_0	H/m	adimensional	$4\pi 10^{-7}H/m = 1uem$
Permeabilidade relativa	μ_r	adimensional	adimensional	
Susceptibilidade magnética	χ_m	adimensional	adimensional	

Tabela 2.1: Unidades das grandezas magnéticas relevantes a este trabalho, nos Sistemas Internacinal (SI) e Gaussiano (CGS)

2.3 Classificação dos materiais magnéticos

O magnetismo é uma propriedade básica que está intrínseca em todos os materiais. Ainda que apenas o ferro, o aço e algumas magnetitas sejam amplamente conhecidos como materiais que apresentam características magnéticas, toda substância existente, seja ela sólida, líquida ou gasosa, é de alguma forma influenciada quando exposta a um campo magnético.

O diamagnetismo e o paramagnetismo são os dois tipos mais comuns de magnetismo. Materiais que apresentam um desses comportamentos à temperatura ambiente são popularmente conhecidos como não-magnéticos, ao passo que os materiais popularmente conhecidos como magnéticos, são na verdade classificados como ferromagnéticos ou ferrimagnéticos.

O valor da susceptibilidade magnética é um dos indicativos do comportamento magnético de um material e serve de auxílio na sua classificação, como indicado pela tabela 2.2 . Materiais fracamente magnéticos podem apresentar um valor de susceptibilidade tão baixo quanto -10^{-5} , enquanto que em materiais fortemente magnéticos este valor pode chegar a 10^6 . Conforme definido pela equação 2.4, nos casos mais simples, em que a magnetização é induzida na mesma direção do campo aplicado, a susceptibilidade magnética é um valor escalar que representa a resposta magnética M que o material dá a este campo H . No entanto, na grande maioria dos casos a relação entre M e H não é linear e a susceptibilidade acaba variando com a intensidade do campo magnético e também com a temperatura.

Do ponto de vista clássico, as propriedades magnéticas dos materiais têm origem nos momentos magnéticos de seus átomos ou íons, mais precisamente, em sua estrutura eletrônica. Cada elétron apresenta dois tipos

Tipo de material	Susceptibilidade χ_m	Permeabilidade μ_r
Diamagnético	<0	<1
Paramagnético	>0	>1
Ferromagnético	»0	»1
Ferrimagnético	»0	»1
Antiferromagnético	>0	>1

Tabela 2.2: Características dos principais tipos de comportamentos magnéticos

de movimentos que dão origem a esses momentos magnéticos [8]: O primeiro está relacionado ao movimento orbital do elétron em torno do núcleo do átomo. Considerando que o orbital delimita um circuito fechado(loop) no qual o elétron(carga em movimento) percorre, este movimento produzirá um pequeno magneto(ou ímã) que terá momento magnético perpendicular ao seu eixo de rotação, conforme figura 2.2(a). O segundo está associado ao movimento de rotação do elétron em torno de si mesmo, e é popularmente conhecido como spin. Neste caso, o momento de dipolo gerado poderá apresentar apenas duas posições. Para cima caso o elétron esteja girando no sentido horário e para baixo caso gire no sentido anti-horário, figura 2.2(b).

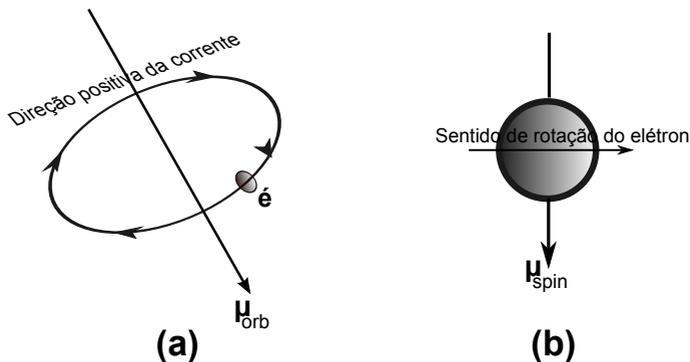


Figura 2.2: (a) Dipolo magnético produzido pelo movimento orbital do elétron; (b) Dipolo magnético produzido pelo "spin" do elétron.

Por estes motivos que a classificação magnética dos materiais é feita com base na origem microscópica de sua magnetização e da natureza de

suas interações internas [2].

2.3.1 Materiais diamagnéticos

O diamagnetismo está presente em todos os materiais, no entanto, por ser um fenômeno muito fraco, um material só é considerado diamagnético quando nele não houverem dipolos magnéticos permanentes que produzam outros efeitos mais pronunciados. Na verdade, o diamagnetismo é o tipo de resposta magnética mais fraca que um sistema pode apresentar, sendo caracterizado por uma susceptibilidade negativa de ordem de grandeza de 10^{-5} .

Este fenômeno tem origem na variação do momentum angular orbital dos elétrons, que é induzida pela aplicação de um campo magnético externo. De acordo com a Lei de Lenz [7], explicação clássica do diamagnetismo, uma variação de campo magnético resulta numa corrente induzida que se opõe a esta variação, em outras palavras, esta variação cria um campo oposto ao aplicado externamente [2]. Na ausência de um campo magnético, os átomos ou íons dos materiais considerados diamagnéticos não exibem dipolos magnéticos, ou seja, não possuem dipolos permanentes e portanto têm suas camadas eletrônicas completas.

Alguns exemplos deste tipo de material são os gases nobres e os sólidos que apresentam ligações iônicas, nos quais os átomos trocam elétrons com o intuito de completarem suas últimas camadas, tais como NaCl, LiF e KBr.

2.3.2 Materiais paramagnéticos

Diferentemente do diamagnetismo, o paramagnetismo não ocorre em todos os materiais. Para que este fenômeno ocorra, o material precisa possuir momentos magnéticos atômicos permanentes que se disponham isolados uns dos outros.

Na ausência de um campo magnético externo, os materiais paramagnéticos, assim como os diamagnéticos, apresentam magnetização nula. Todavia, graças a tendência que os dipolos magnéticos atômicos apresentam de se alinharem paralelamente com campos magnéticos, a incidência de um

campo, numa determinada direção, faz com que estes materiais produzam uma magnetização de pequena intensidade nesta mesma direção. Por isto, materiais paramagnéticos apresentam um valor de susceptibilidade positivo, o qual varia da ordem de 10^{-5} à 10^{-3} .

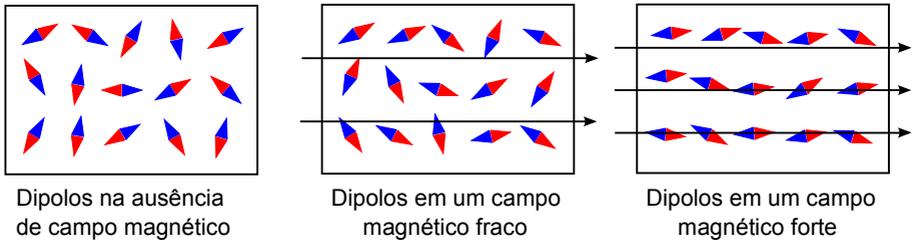


Figura 2.3: Comportamento dos dipolos de um material paramagnético

Uma das principais características dos materiais paramagnéticos é a capacidade que seus dipolos magnéticos atômicos têm de poder mudar de direção livremente, sem influenciar ou serem influenciados pelos dipolos vizinhos. Esta característica possibilita que, na ausência de campo magnético externo, os momentos de dipolo sejam movidos pela agitação térmica e apontem para direções aleatórias, cancelando uns aos outros. Isto justifica o fato destes materiais não possuírem memória magnética e também de exibirem magnetização resultante nula na ausência de campo magnético mesmo possuindo em sua estrutura molecular momentos magnéticos permanentes. A figura 2.3 auxilia na compreensão do comportamento.

Quando um campo externo é aplicado, ainda que muitos dos dipolos não consigam se alinhar a ele, a orientação média dos dipolos do material passa a produzir uma magnetização resultante que aponta para direção do campo. Se a intensidade do campo aumenta, a energia de interação dos dipolos com o campo aumenta em relação a energia térmica e, conseqüentemente, a ordem do sistema também aumenta.

Conforme o gráfico da figura 2.4 (a), é possível observar que, para certas faixas de temperatura, M é diretamente proporcional a H . No entanto, caso o campo magnético seja mantido constante e a temperatura aumente, a agitação térmica também aumentará e isto resultará numa menor suscep-

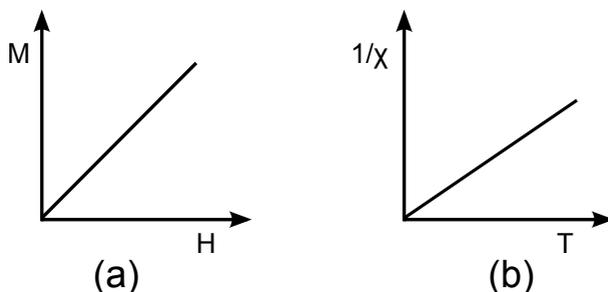


Figura 2.4: Características de materiais paramagnéticos: (a) Variação da magnetização com o Campo; (b) Variação do inverso da susceptibilidade com a temperatura.

tibilidade. Este comportamento é explicado pela lei de Curie, que diz que susceptibilidade decresce com o inverso da temperatura, figura 2.4(b) .

2.3.3 Materiais ferromagnéticos

Os materiais ferromagnéticos são aqueles que, à temperatura ambiente, interagem mais fortemente com campos magnéticos, apresentando alta magnetização resultante mesmo quando submetidos a pequenos campos externos. Suas acentuadas propriedades magnéticas são caracterizadas por altos valores de susceptibilidade, que podem variar de 10^2 à 10^6 , e possibilitaram o desenvolvimento de grande parte dos dispositivos elétricos, eletromecânicos e eletrônicos presentes na atualidade. Motores elétricos, geradores, transformadores, cartões de memória e discos rígidos são exemplos claros de como o uso destes materiais têm sido relevante para a humanidade. Sendo assim, pode-se dizer que esta classe de materiais magnéticos é uma das mais importantes, não só para a indústria atual, mas também para o desenvolvimento de novas tecnologias, como por exemplo, a de sensores magnetorresistivos.

Esta classe de materiais apresenta em sua estrutura atômica um fenômeno chamado "alinhamento de longo alcance". Este fenômeno, de origem eletrostática e natureza quântica, é consequência da forte interação de intercâmbio que há entre os spins dos elétrons de átomos vizinhos. Esta interação faz com que um grande número destes spins alinhem-se paralelamente

numa mesma direção causando a formação de domínios magnéticos. Por consequência deste alinhamento, dentro de cada domínio magnético sempre existirá uma magnetização e um campo magnético muito intenso, porém o material como um todo normalmente apresentará magnetização nula, uma vez que cada domínio se dispõe numa orientação aleatória na qual seus dipolos se alinham [2].

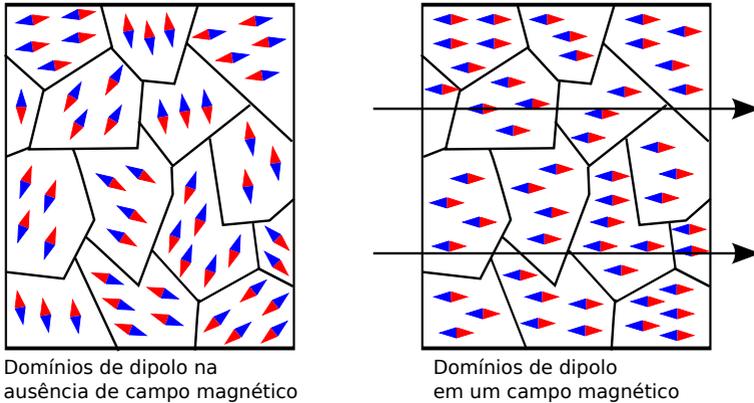


Figura 2.5: Comportamento dos domínios de dipolo de um material ferromagnético

Portanto, diferentemente dos materiais paramagnéticos, onde os dipolos magnéticos estão isolados uns dos outros, nos materiais ferromagnéticos eles estão agrupados em domínios. Este arranjo de domínios magnéticos é o grande diferencial destes materiais pois faz com que campos magnéticos extremamente fracos tenham capacidade de alinhar seus dipolos enquanto que, campos muito mais fortes são necessários para alinhar dipolos que estejam isolados. Este comportamento pode ser melhor compreendido na figura 2.5.

Outra característica muito importante, que só os materiais ferro e ferromagnéticos (os quais serão abordados na próxima seção) apresentam, é a tendência de permanecerem magnetizados após a remoção do campo externo. Esta tendência de memorização magnética é conhecida como histerese e a fração da magnetização que fica retida no material é conhecida por remanência.

Existe porém, uma temperatura na qual estes materiais perdem suas propriedades magnéticas. Este ponto, conhecido como temperatura de Curie, determina o valor de temperatura no qual a energia de agitação térmica é tão alta que rompe as forças de interação que existem entre os dipólos de cada domínio, fazendo com que estes dipolos adquiram uma orientação aleatória. Para temperaturas acima da temperatura de Curie, materiais ferromagnéticos passam a se comportarem como materiais paramagnéticos, apresentando magnetização de saturação igual a zero, conforme figura 2.6. Valores de temperaturas de Curie podem variar de dezenas à milhares de Kelvins, dependendo do material.

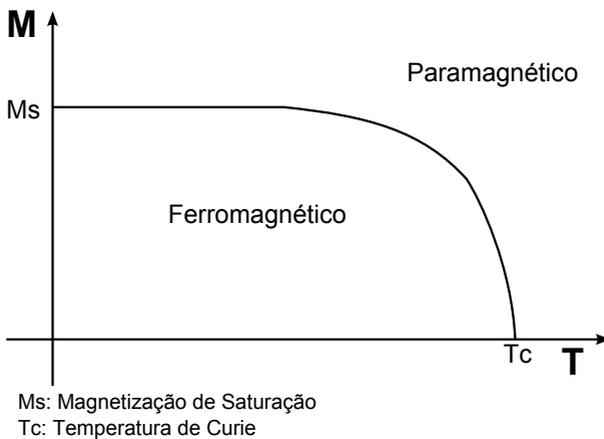


Figura 2.6: Curva de variação da magnetização espontânea de materiais ferromagnéticos em função da temperatura

Os principais representantes dos materiais ferromagnéticos são os elementos do grupo de transição do ferro: Ferro, níquel e cobalto, puros ou em ligas com outros elementos.

2.3.4 Materiais ferrimagnéticos

O ferrimagnetismo ocorre em compostos iônicos, onde a interação de intercâmbio entre dois íons vizinhos pode ser negativa. Esta capacidade de interação faz com que os spins destes materiais tenham tendência de se

alinhar na mesma direção porém em sentidos opostos, induzindo o leitor a imaginar que sua magnetização seja nula. Entretanto, isto não ocorre porque os momentos de dipolo vizinhos, os quais apresentam sentidos opostos, são diferentes, fazendo com que a magnetização resultante destes materiais seja diferentes de zero [2], conforme figura 2.7.

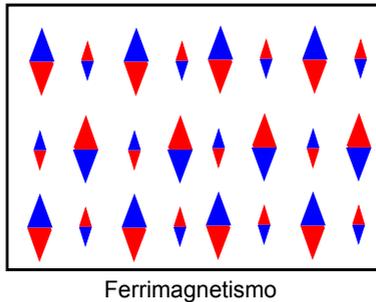


Figura 2.7: Comportamento dos domínios de dipolo de um material ferrimagnético

Apesar da diferença estrutural, do ponto de vista macroscópico estes materiais são muito semelhantes aos ferromagnéticos. Exibem as mesmas características de histerese, remanência e de ordenamento magnético dependente da temperatura. Porém, algumas ferrites apresentam duas características particulares que fazem com que estes materiais tenham grande importância tecnológica. Uma é alta resistividade e a outra a alta velocidade de resposta magnética, sendo que a primeira permite que estes materiais sejam utilizados em aplicações de alta frequência, pois não desenvolvem as correntes parasitas que, nos materiais ferromagnéticos, geram perda de energia na forma de calor [2].

2.3.5 Materiais antiferromagnéticos

Assim como no ferrimagnetismo, no antiferromagnetismo a interação de intercâmbio entre dois íons vizinhos também é negativa, fazendo com que os dipolos se alinhem na mesma direção porém em sentidos opostos. A diferença é que nesta classe de materiais, os momentos de dipolo são iguais, o que acarreta em um magnetização resultante nula, conforme mostrado

na figura 2.8. Portanto, apesar destes materiais serem alvo de estudo da comunidade científica devido a forte interação de intercâmbio que ocorre entre seus íons, a ausência de magnetização resultante faz com que sejam raríssimas suas aplicações tecnológicas.

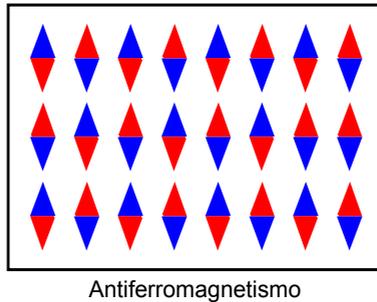


Figura 2.8: Comportamento dos domínios de dipolo de um material antiferromagnético

2.4 Efeitos de magnetorresistência

Magnetorresistência é uma propriedade apresentada por um material ou conjunto de materiais que resulta na alteração do valor de sua resistência quando exposto a um campo magnético. Foi a descoberta de efeitos magnetorresistivos de grande porte que levou ao desenvolvimento de sensores magnéticos de estado sólido capazes de substituir sensores discretos numa grande variedade de aplicações [9].

Todos os condutores apresentam propriedades magnetorresistivas. Porém, o efeito de magnetorresistência por eles apresentado é muito fraco para ser utilizado no desenvolvimento de sensores, e por isto, é chamado magnetorresistência ordinária(MRO). Os materiais magnéticos por sua vez, exibem um efeito de magnetorresistência mais forte, conhecido como magnetorresistência anisotrópica(MRA). Este efeito apresenta uma variação de resistência mais significativa, possibilitando a utilização destes materiais na concepção de sensores magnéticos. Finalmente, os recentes avanços das

tecnologias de deposição de filmes finos permitiram que pesquisadores criassem nanoestruturas de múltiplas camadas que apresentam efeitos de magnetorresistência ainda maiores, conhecidos como magnetorresistência gigante(GMR) e magnetorresistência de tunelamento(TMR) [9].

A figura de mérito utilizada para avaliar a magnetorresistência de um material é conhecida como razão MR e definida pela equação 2.7:

$$MR\% = \frac{R_{max} - R_{min}}{R_{min}} \quad (2.7)$$

De acordo com um artigo publicado por James Lenz em 2006 [1], sensores AMR apresentam valores de MR menores de 4%, sensores GMR chegam aos 80% e os sensores TMR podem chegar 220%. Todavia, em vista dos últimos avanços tecnológicos, atualmente esses valores são ainda maiores.

2.4.1 Magnetoresistência ordinária(OMR)

O efeito de magnetorresistência ordinária tem origem no movimento cíclico dos elétrons e, como mencionado anteriormente, é o efeito magnetorresistivo mais fraco que um material pode apresentar.

Todos os metais apresentam MRO positiva, ou seja, sua resistividade aumenta com a incidência de um campo magnético externo $\rho_H > \rho_o$. Entretanto, a taxa na qual a resistividade irá aumentar depende da direção do campo aplicado. Quando a direção do campo magnético H é paralela a direção da corrente j existe um efeito de magnetorresistência longitudinal, o qual apresenta uma taxa de variação de resistividade muito baixa, quase que nula. Porém, quando a direção campo magnético H é perpendicular à direção da corrente, existe um efeito de magnetorresistência transversal, o qual, apesar de não ser grande o suficiente para ser utilizado no desenvolvimento de sensores, é muito mais significativo do que o de magnetorresistência longitudinal [10].

Ainda que seja importante ter conhecimento deste efeito magnetorresistivo, os baixos valores de MR por ele apresentados(cerca de 0,1%), invalidam sua aplicabilidade tecnológica. Portanto, uma profunda explanação

deste efeito está fora do escopo deste trabalho.

2.4.2 Magnetorresistência anisotrópica(AMR)

O efeito de magnetorresistência anisotrópica, que ocorre em materiais ferromagnéticos, foi descoberto por William Thomson, na cidade de Glasgow, em 1857. Thomson constatou que, mediante a aplicação de um campo magnético externo, tanto o ferro quanto o níquel poderiam aumentar ou diminuir sua resistência elétrica, dependendo apenas da direção que este campo fosse aplicado [11].

Portanto, os materiais anisotrópicos são aqueles que apresentam resistividade elétrica dependente do ângulo formado entre os vetores magnetização e corrente elétrica. Sendo que, o valor máximo de resistência ocorrerá quando a direção da magnetização for paralela a direção da corrente elétrica. Já o valor mínimo, quando a magnetização for perpendicular a corrente elétrica, conforme mostrado nas figuras 2.9(a) e (b).

Geralmente, a resistência de um material anisotrópico é descrita por uma função do ângulo, θ , formado entre a magnetização e a corrente [9]:

$$R = R_o + \Delta R \cos^2(\theta) \tag{2.8}$$

Através do comportamento descrito pela eq 2.8 e exibido na figura 2.9(c) é possível observar que o ponto de maior sensibilidade e linearidade é alcançado quando a magnetização do material forma um ângulo de 45° com a corrente elétrica.

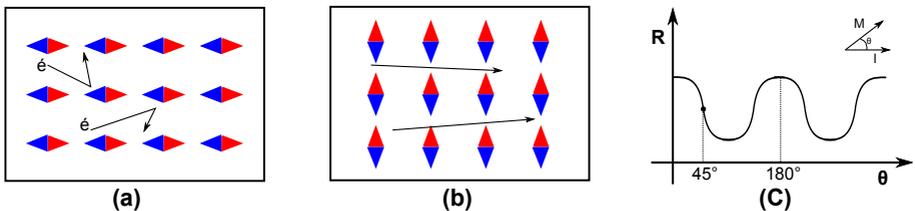


Figura 2.9: Ilustração do efeito AMR quando: (a) Magnetização é paralela a corrente (b) magnetização é perpendicular a corrente e (c) Variação da resistência em função do ângulo formado entre a corrente e a magnetização

Este alinhamento de 45° , que torna o efeito AMR ainda mais interessante, é comumente obtido através da inserção de faixas diagonais de metais altamente condutivos, conhecidos como "barber poles", figura 2.10(a). Estes metais fazem com que a corrente flua numa direção perpendicular à direção na qual eles estão dispostos, enquanto que o vetor magnetização permanece preferencialmente paralelo a direção do comprimento do dispositivo. Esta configuração faz com que, na ausência de campo magnético externo, a magnetização do material sempre forme um ângulo de 45° com a corrente elétrica e, conseqüentemente, apresente sensibilidade e linearidade máximas. A inserção de um campo magnético resultará numa variação de resistência através da rotação do vetor magnetização, conforme mostrado no gráfico da figura 2.10(b).

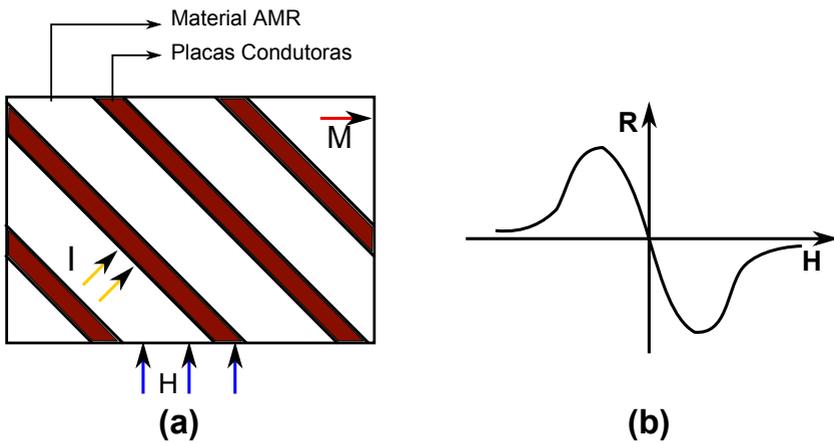


Figura 2.10: (a) Estrutura "barber-pole" de placas metálicas que restringem a corrente a fluir à 45° da posição de repouso da magnetização (b) Variação da resistência em relação ao campo para um dispositivo AMR "barber-pole"

Apesar dos materiais anisotrópicos apresentarem baixos valores de MR e saturarem com campos magnéticos muito fracos (abaixo de 1mT), sua alta resolução, linearidade e sensibilidade (cerca de 60mV/mT), somados à um histórico de aceitação no mercado, fazem com que atualmente estes sejam os materiais mais utilizados na confecção de sensores MR [12].

2.4.3 Magnetorresistência gigante(GMR)

Após a descoberta da AMR foi necessário mais de um século para que fosse descoberta a GMR. Mais precisamente, foi em 1988 que o pesquisador brasileiro Baibich, junto de seus companheiros de trabalho da Université Paris-Sud, divulgaram ter descoberto um efeito de MR que ocorre em estruturas de duas ou mais camadas de filme fino e que, no tempo da descoberta, poderiam apresentar variações de 10% à 15% no valor de sua resistência [13]. Pelo fato destes valores serem muito maiores do que os anteriormente apresentados pelas tecnologias de MRO e AMR, este efeito magnetorresistivo foi chamado de magnetorresistência gigante.

De forma mais detalhada, uma estrutura GMR é composta de duas ou mais camadas de metal ferromagnético, separadas por uma camada ultra-fina de metal não magnético. Ainda que esta não seja a única maneira possível de obter o efeito GMR, para que ele ocorra é necessário que a camada de metal não magnético, que separa as camadas ferromagnéticas, seja extremamente fina, de modo que os elétrons possam passar livremente de uma camada para a outra sem que a polarização de seu spin seja alterada por espalhamento [9]. Sendo assim, a camada de separação realiza duas importantes funções na estrutura GMR. A primeira é permitir que as camadas ferromagnéticas tenham magnetização de orientação distinta, e a segunda é permitir a livre passagem de elétrons através de sua ultra-fina espessura.

Portanto, na ausência de campo magnético, as camadas ferromagnéticas apresentarão magnetização antiparalela, graças ao acoplamento antiferromagnético gerado pelo metal que as separa. Neste caso, elétrons provenientes de uma camada, portando uma certa polarização, serão impedidos de se locomoverem para uma camada vizinha. Isto faz com que haja um rompimento no movimento livre e arbitrário do elétron, aumentando a resistência da estrutura. Porém, quando existir um alinhamento paralelo entre as camadas vizinhas devido a incidência de um campo magnético, os elétrons ficarão relativamente livres para se moverem entre as camadas, ou seja, a resistência imposta pela estrutura será mínima. As figuras 2.11(a) e (b) facilitam a compreensão qualitativa do comportamento do elétron nas

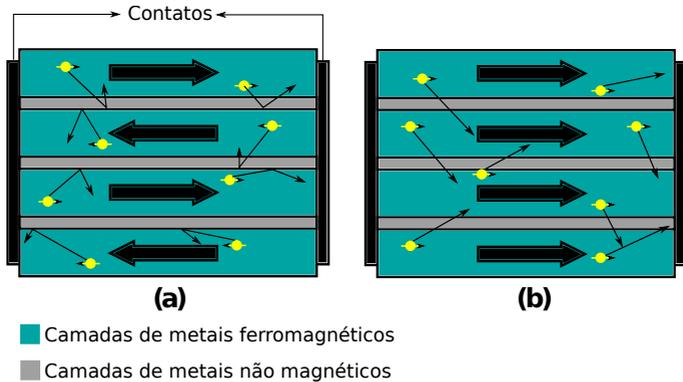


Figura 2.11: Ilustração de uma estrutura GMR (a) Na ausência de campo magnético, com alinhamento antiparalelo de magnetização e alto espalhamento (b) Na presença de campo magnético, com alinhamento paralelo de magnetização e baixo espalhamento

condições mencionadas acima, enquanto a figura 2.12 representa graficamente o que ocorre com a resistência e com a magnetização de uma estrutura MRG, quando um campo magnético é aplicado na direção de seu eixo sensível [14].

Uma versão modificada da estrutura MRG de múltiplas camadas que é muito utilizada atualmente é a "spin-valve". Esta estrutura utiliza apenas duas camadas de metal ferromagnético, sendo que camada ferromagnética de baixo é depositada diretamente em cima de uma camada antiferromagnética muito espessa, chamada de "pinning-layer". Esta pinning layer não apresenta magnetização resultante, entretanto, tem a capacidade de fixar a magnetização da camada ferromagnética adjacente numa determinada direção. Sendo assim, apenas a camada de cima fica livre para rotacionar sua magnetização em resposta à incidência de campo magnético [9]. Apesar dessa estrutura apresentar valores de MR e de campo de saturação muito mais baixos do que a estrutura de múltiplas camadas, sua sensibilidade pode chegar a ser uma ordem de grandeza maior do que da anterior, e por este motivo são amplamente utilizadas na indústria [15]. Uma ilustração da versão spin-valve pode ser observada na figura 2.13.

Outra informação importante é que, nos dispositivos GMR, a corrente ti-

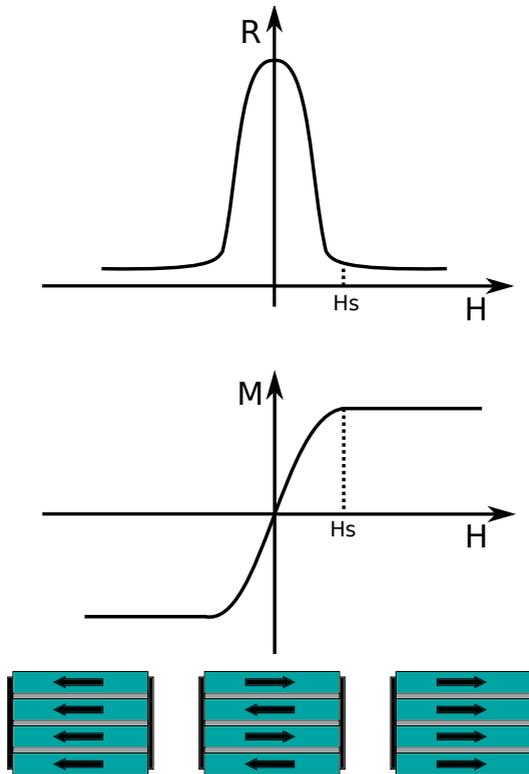


Figura 2.12: Representações gráficas da variação da resistência e da magnetização com o campo magnético em uma estrutura MRG ideal

picamente flui ao longo do plano dos filmes magnéticos. Esta forma de condução, onde os contatos são colocados nas extremidades longitudinais das camadas metálicas, é conhecida como CIP "current-in-plane". Ainda que o efeito de GMR seja proveniente do desvio dos elétrons de uma camada para a outra, a forma de condução CPP "current-perpendicular-to-plane", análoga da CIP, não é utilizada porque apresenta valores de resistência muito baixos, os quais inviabilizam sua aplicação prática [9].

Atualmente, assim como a tecnologia de AMR, a GMR vêm sendo altamente comercializada. Algumas de suas principais aplicações são: discos rígidos, memórias RAM e os isoladores galvânicos [15].

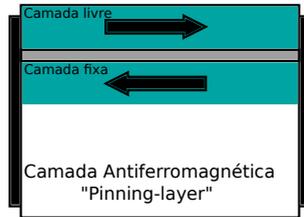


Figura 2.13: Ilustração de uma spin-valve

2.4.4 Magnetorresistência de tunelamento(TMR)

As primeiras observações de pequenos efeitos de magnetorresistência de tunelamento foram relatadas em 1975 por M. Jullière [16] e em 1982 pelos estudiosos Maekawa e Gafvert [17]. No entanto, devido a inviabilidade de fabricação da época, as pesquisas sobre este tema só ganharam força no ano de 1995 [18].

O efeito de TMR acontece em estruturas conhecidas como junções de tunelamento magnético(MTJs), que são muito similares às spin-valves. A grande diferença entre estas duas estruturas é que na MTJ as camadas ferromagnéticas são separadas por uma camada ultra-fina de material isolante, ao passo que nas spin-valves o material que separa estas camadas é um condutor. Isto faz com que os elétrons tenham que, através de efeitos quantum-mecânicos, tunelar pelo material isolante para que possam se movimentar de uma camada magnética para a outra.

A facilidade com que um elétron "tunela"é determinada pelo ângulo formado entre os vetores de magnetização das camadas de tunelamento. Se os vetores estiverem em alinhamento paralelo, muitos estados ficam disponíveis na camada de baixo para que elétrons vindos da camada de cima possam tunelar, fazendo com que a resistência de tunelamento seja mínima. Caso o alinhamento seja antiparalelo, os elétrons polarizados vindos de uma camada encontrarão uma resistência de tunelamento muito maior. Isto acontece porque a orientação de seu spin é contrária a orientação do vetor magnetização da camada de destino. As ilustrações da figura 2.14 facilitam a compreensão deste fenômeno [9].

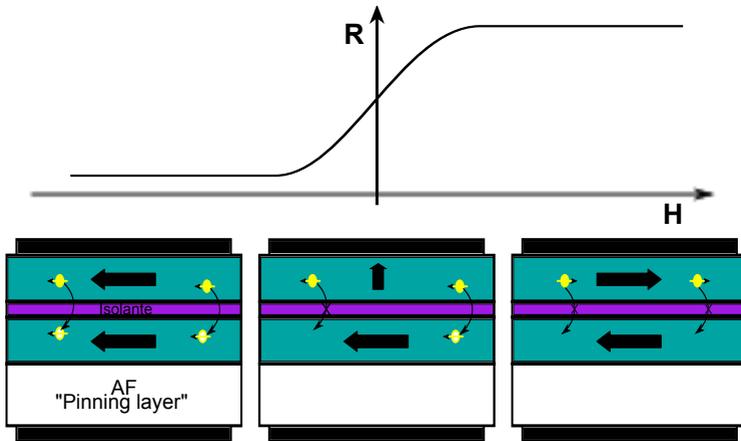


Figura 2.14: Ilustração gráfica e física da variação da resistência com o campo magnético em uma estrutura MTJ

É importante ressaltar que, assim como nas spin-valves, as estruturas de TMR também utilizam uma camada de material antiferromagnético para polarizar o vetor magnetização da camada ferromagnética adjacente, fazendo com que uma camada apresente magnetização fixa e a outra fique livre. Na ausência de campo magnético externo, a orientação do vetor magnetização da camada livre é perpendicular ao da camada fixa, sendo que este é o ponto onde se obtêm maior linearidade e sensibilidade. Portanto, campos magnéticos orientados ao longo do eixo sensível da estrutura poderão, dependendo do sentido, aumentar ou diminuir sua resistência. Caso apontem em um sentido que diminua o ângulo formado entre os vetores magnetização das camadas, a resistência diminuirá, caso contrário, aumentará.

A condução dos elétrons nos dispositivos TMR é do tipo CPP, ou seja, a corrente flui perpendicular ao sanduíche de camadas ferromagnéticas e os contatos são colocados no topo e no fundo da estrutura, conforme mostrado na figura 2.14. Para que a resistência não fique muito baixa, múltiplos dispositivos de TMR são geralmente colocados em série, limitando a tensão em cada barreira de tunelamento. Ainda assim, tensões acima de algumas centenas de milivolts poderão danificar o material isolante [9].

Apesar de já estar sendo comercializada e inserida em diversos setores

da indústria, a tecnologia de TMR ainda está em seu período de maturação. A cada ano que passa valores mais altos de MR são alcançados utilizando diferentes ligas metálicas e diferentes isolantes. Pesquisas mais recentes apontam que, à temperatura ambiente, já é possível obter valores de razão MR de até 600% [19] utilizando junções de tunelamento baseadas em óxido de magnésio.

Capítulo 3

Materiais e métodos

Este trabalho será conceitualmente dividido em três etapas de desenvolvimento: (1) Projeto e confecção da PCI, (2) Caracterização dos sensores e descrição dos testes, (3) Análise de dados e modelo funcional. O objetivo deste capítulo é detalhar as atividades que serão realizadas em cada uma dessas etapas e descrever os materiais que nelas serão utilizados.

3.1 Materiais

Antes de partir para a explicação do método de realização do trabalho, serão apresentados os sensores que foram selecionados para a caracterização e os materiais disponíveis para a realização dos testes.

3.2 Descrição dos sensores

3.2.1 AMR - HMC1022TR

O HCM1022TR é um sensor de estado sólido desenvolvido pela Honeywell para medir direção e magnitude de campos magnéticos fracos. De acordo com seu datasheet [24], é capaz de detectar campos na faixa de dezenas de μOe até $\pm 6 Oe$. Sua unidade de sensoriamento é constituída por quatro elementos magnetorresistivos conectados em ponte de Wheatstone. Esta configuração é utilizada pela grande maioria dos sensores magnetorresistivos pois permite compensar o sistema em temperatura e aumenta a sua sensibilidade. O valor da resistência da ponte no HMC1022TR é de aproximadamente 850 ohms.

Na figura 3.1, é possível observar a pinagem e o diagrama do bloco funcional do sensor. Os pinos $SR(+)$ e $SR(-)$ são utilizados para realinhar os domínios magnéticos do sensor, resetando seu funcionamento, caso ele tenha sido exposto a um campo magnético de intensidade superior a $10 Oe$. Os pinos da parte de baixo do package tem a mesma função dos da parte de cima, porém para um sensor com em outra orientação.

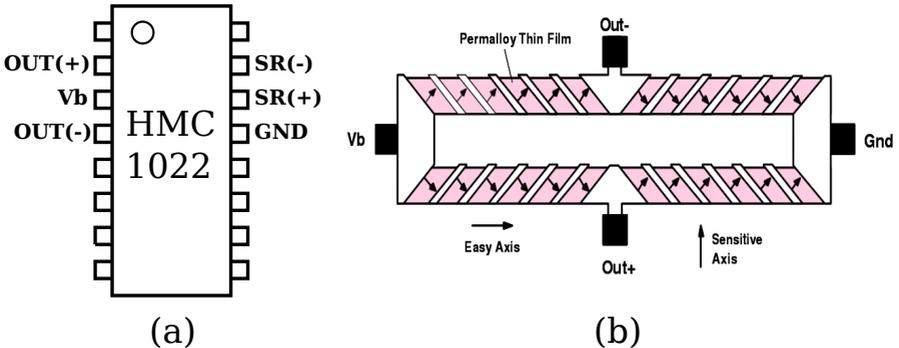


Figura 3.1: Ilustração do sensor HMC1022:(a) Pinagem do package; (b) Diagrama do bloco funcional Fonte: Datasheet [24]

Preço médio: \$6.35 - Package SOIC 16

3.2.2 GMR - AA00302

O AA00302 é um sensor de estado sólido desenvolvido pela NVE para aplicações que requerem alta sensibilidade, alta estabilidade térmica, baixo consumo de potência e pequena área.

Estes sensores utilizam uma tecnologia GMR desenvolvida pela própria NVE e concentradores de fluxo magnético para prover um sinal de saída sensível à direção. Isto quer dizer que eles são sensíveis apenas em uma direção do plano do chip e que sua sensibilidade decresce com a função cosseno à medida que o sensor é rotacionado de seu eixo de sensibilidade. Além disto, campos magnéticos aplicados no sentido positivo ou negativo deste eixo produzirão um mesmo sinal de saída, ou seja, não são capazes de detectar o sentido do campo, comportamento omnipolar.

Assim como o sensor HMC1022TR e a grande maioria dos sensores magnetorresistivos, o AA00302 é constituído por quatro elementos sensores conectados em ponte de Wheatstone, esta configuração é utilizada para garantir maior imunidade às variações de temperatura e maior linearidade. Na ausência de campo magnético a resistência da ponte é de 5 Kohms, mediante a incidência de um campo este valor pode variar de 4 Kohms à 6 kohms, $\pm 20\%$.

A figura 3.2 , ilustra um diagrama funcional do sensor e a pinagem de seu chip. Maiores informações sobre este sensor podem ser encontradas em seu datasheet [23].

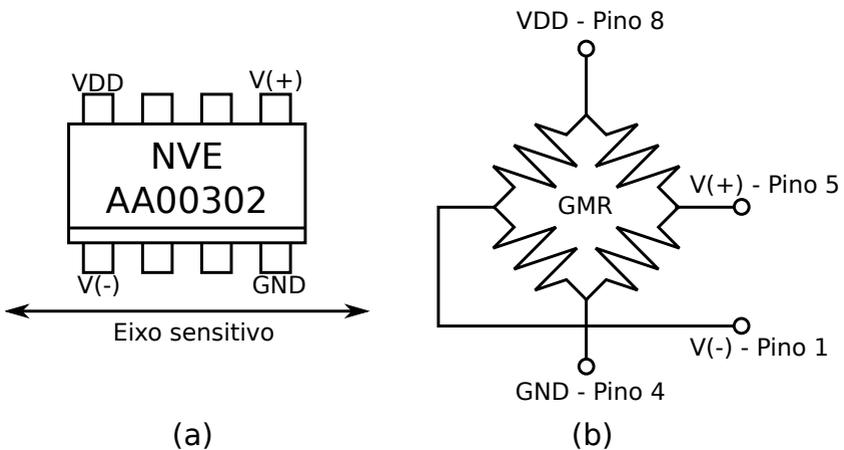


Figura 3.2: Ilustração do sensor AA00302:(a) Pinagem do package; (b) Diagrama do bloco funcional

Preço médio: \$6.58 - Package: SOIC 8

3.2.3 MTJ - ADIR

O ADIR é um sensor de estado sólido desenvolvido pela Crocus Technology para aplicações que requerem ultra baixo consumo, alta sensibilidade, alta linearidade e boa estabilidade térmica.

Por estar em fase de desenvolvimento, não se tem muitas informações a respeito do comportamento do dispositivo e um datasheet oficial ainda não

está disponível. No entanto, sabe-se que este sensor é baseado na tecnologia MTJ e que, ainda que ocupe cerca de um quarto da área ocupada pelos sensores AMR e GMR, pode apresentar valores de resistência de dezenas de kilo ohms. Seu elemento resistivo é composto por duas camadas ferromagnéticas separadas por uma camada muito fina de material isolante. A espessura do material isolante é o parâmetro mais importante para determinação da resistência do sensor.

A versão atual do dispositivo ainda não utiliza ponte de Wheatstone. Para emular essa configuração e possibilitar uma comparação justa entre as três tecnologias, quatro chips de sensor ADIR serão conectados externamente em forma de ponte. A curva típica do sensor pode ser observada na figura 3.3. A figura 3.4(a) e (b) mostra a pinagem e o diagrama do bloco funcional do dispositivo. Os pinos i_{in} e i_{ingnd} são utilizados quando há necessidade de polarizar o sensor em um dado ponto, porém não serão utilizados neste trabalho.

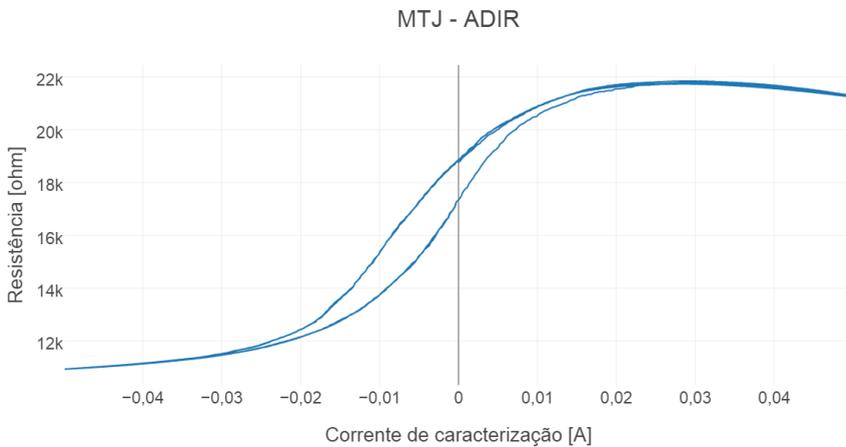


Figura 3.3: Curva típica de variação de resistência de um sensor MTJ-ADIR

Preço médio: N.A - Package: QFN 16

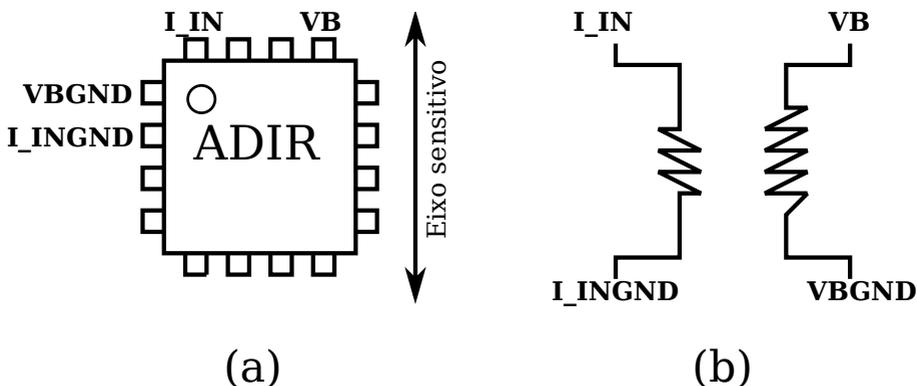


Figura 3.4: Ilustração do sensor ADIR: (a) Pinagem do package; (b) Diagrama do bloco funcional

3.3 Descrição dos instrumentos

Listadas abaixo estão breves descrições dos principais instrumentos que serão utilizados na realização deste trabalho tabalho.

- SMU: Agilent - B2902A Unidade de alimentação e medição de precisão, 2 canais, 100 fA, 210 V, 3 A CC/10,5 A CA.
- Test fixture: Agilent - N1295A Dispositivo de ensaio, 4 entradas triaxiais, 42 V, 1 A.
- Adaptador: Agilent - N1294A Opt 001 Adaptador banana-triaxial para 2 cabos.
- Câmara térmica: Tenney thermal product solutions - TUJR, $-75^{\circ}C$ à $200^{\circ}C$.
- Hot Air Pencil: Metcal - SMT1101 Estação de solda de ar quente
- Multímetro digital: Hikari - HM2030 Display LCD, 1000 V CC/750 V CA, 20A CC/20 A CA.

3.4 Metodologia

3.4.1 Projeto e confecção da PCI

O principal objetivo no desenvolvimento desta PCI é prover o ambiente mais adequado possível para realização dos testes, fazendo com que todos os sensores estejam expostos as mesmas condições de contorno, incluindo: temperatura, tensão de alimentação, espessura e espaçamento dos fios condutores, e condicionamento do sinal de saída.

Para realizar esta atividade será utilizado um software livre de design assistido por computador, chamado Eagle, no qual serão projetados o esquemático e o leiaute da placa. Através dele também serão gerados arquivos Gerber, que carregam todas as informações necessárias para que a placa possa ser fabricada. Estes arquivos serão enviados para uma empresa especializada na fabricação de PCIs, que retornará a placa pronta para o processo de soldagem.

Na placa deverão estar presentes os seguintes componentes: 1 sensor AMR, 1 sensor GMR, 4 sensores MTJ, 1 regulador de tensão, 1 amplificador diferencial, 1 led e alguns resistores e capacitores smd. O motivo para utilização de quatro sensores MTJ é que, como mencionado anteriormente, a estrutura interna dos sensores AMR e GMR é formada por quatro elementos resistivos conectados em ponte de Wheatstone. No caso do MTJ, por estar em fase de desenvolvimento, a estrutura em ponte ainda não está disponível. Por isso, quatro chips de sensores MTJ, selecionados dentre vinte amostras de um mesmo lote, serão utilizados na placa para emular essa configuração. Ainda que o descasamento entre os elementos resistivos desses sensores possa ser muito maior do que o apresentado pelo AMR e GMR (que são casados internamente), através da seleção minuciosa das quatro amostras será possível formar uma ponte relativamente bem casada.

No esquemático da figura 3.5 é possível observar não só os componentes que serão utilizados, mas também como cada um deles será conectado. Os círculos com preenchimento foram utilizados para representar conexões que serão feitas por trilhas na placa, já os círculos sem preenchimento representam os nós que estarão em aberto e que serão conectados externa-

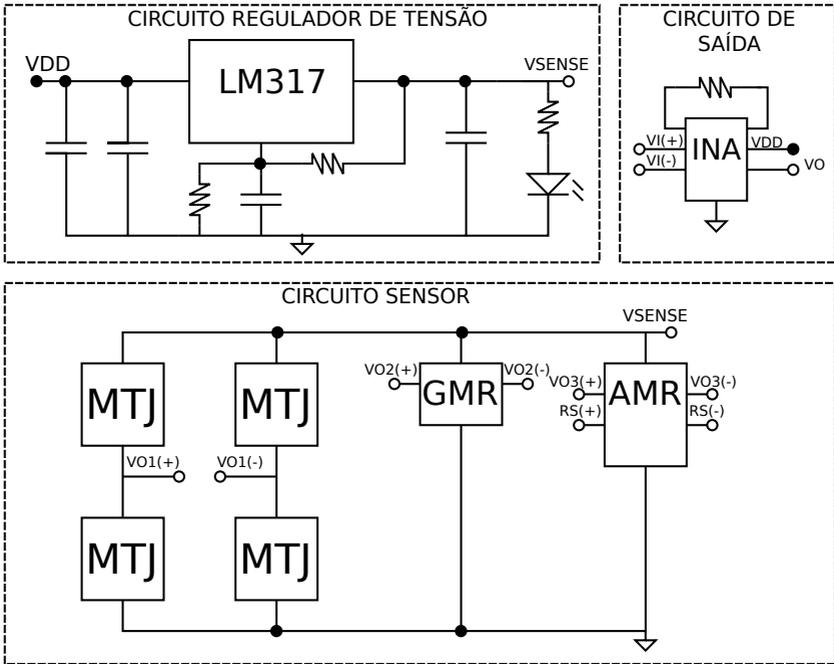


Figura 3.5: Esquemático da PCI

mente mediante a realização de um teste. Os valores das resistências e dos capacitores foram selecionados de modo a obter 3.5V na saída do regulador(LM317) e um ganho de 6 vezes no amplificador diferencial(INA122 [25]).

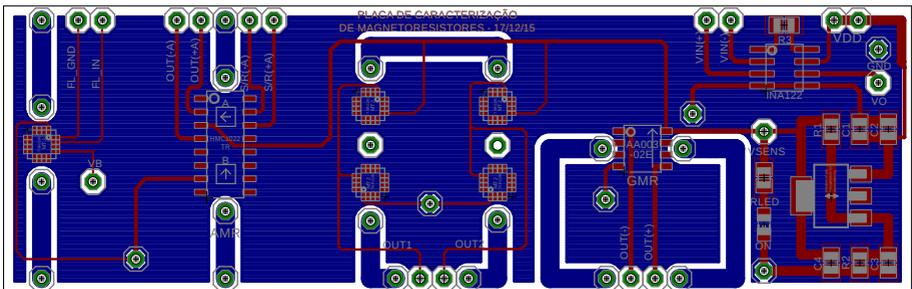


Figura 3.6: Leiaute da PCI

O leiaute da placa pode ser observado na figura 3.6, onde a cor vermelha

representa as trilhas dispostas na parte de cima da placa e a cor azul, às da parte de baixo. A partir deste leiaute foram gerados os arquivos Gerber que foram enviados para fabricação. A foto da placa, após a soldagem e fixação dos componentes, é mostrada na figura 3.7.

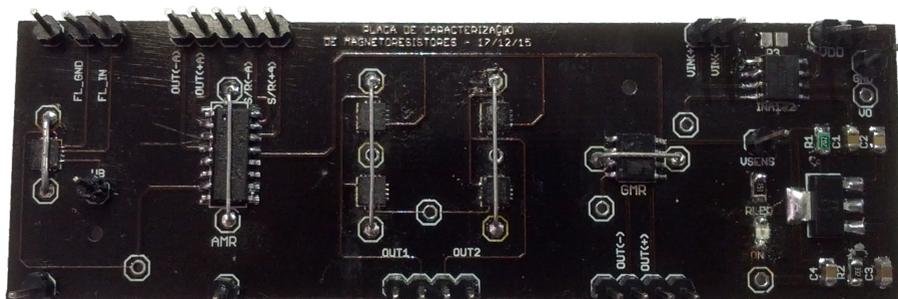


Figura 3.7: PCI concluída

3.4.2 Caracterização dos sensores e descrição dos testes

Em geral, sensores magnetorresistivos apresentam alta sensibilidade, ou seja, são capazes de detectar pequenas variações de campo magnético. Desta forma, uma caracterização de qualidade só poderá ser realizada mediante o uso de uma fonte de campo magnético constante e precisa, que possa gerar campos fracos e ser controlada pelo usuário para diminuir ou aumentar sua intensidade com exatidão.

De acordo com a lei de Biot-Savart, um fio retilíneo portando uma corrente constante é também uma fonte de campo magnético de intensidade, direção e sentido constantes [20]. Portanto, sobre cada um dos sensores será soldado um fio condutor de corrente elétrica, os quais terão a função de gerar campos magnéticos constantes sobre os sensores. O fluxo de corrente nos fios será controlado por uma SMU (source-measure unit), de modo que o usuário tenha controle sobre a intensidade e a direção do campo gerado. Devido às restrições impostas pelos cabos da SMU, os testes a serem realizados estarão restritos a uma corrente máxima de 1 A.

Nessas condições quatro testes serão realizados:

1. Teste de extração da curva característica:

Para extrair a curva característica dos sensores, a SMU será configurada para fazer uma varredura de corrente de -1 a 1 A, utilizando passos de 5 mA. O resultado que deseja ser obtido através deste teste são curvas de tensão(parâmetro de saída) por corrente(parâmetro de entrada), que permitirão a extração dos valores de sensibilidade, linearidade e histerese de cada sensor.

2. Teste de repetibilidade:

Após realizada a extração das curvas características, será possível determinar a faixa linear de operação de cada sensor. Esta faixa delimita a região que eles foram projetados para operar corretamente e por isso, será utilizada para realização do teste de repetibilidade.

Neste teste, a SMU será configurada para fazer uma varredura apenas da faixa de corrente em que os sensores apresentam um comportamento linear. Este processo será repetido por dez vezes com cada sensor e a partir disso, será possível extrair a precisão das respostas que eles apresentam.

3. Teste de extração do coeficiente de temperatura:

Uma câmara térmica será utilizada para realização dos testes em temperatura. Essa câmara permite conexões externas e, portanto, a PCI pode ser colocada em seu interior enquanto conectada por meio de cabos à SMU. A configuração utilizada pela SMU será a mesma que foi utilizada no teste de repetibilidade. A varredura será realizada nas seguintes temperaturas: -40, -25, 0, 25, 50 e 80 °C.

A partir da análise das curvas obtidas neste teste, será possível observar a influência da variação da temperatura sob o comportamento dos sensores e também, determinar quantitativamente esta influência através da extração do coeficiente de temperatura.

4. Teste de resolução:

O teste de resolução, também conhecido por detectividade, é necessário para determinar a variação mínima de corrente(campo magnético)

que pode ser detectada na saída do sensor. Para realizar este teste, a SMU será configurada para efetuar incrementos de corrente cada vez menores, partindo de 100 mA. Seis incrementos de corrente serão efetuados com cada valor antes que o incremento seja reduzido. Por exemplo: A SMU incrementará 100 mA na corrente do fio condutor, seis vezes seguidas. Caso o sensor detecte aos seis incrementos, a SMU passará a realizar incrementos de 50 mA na corrente, e assim sucessivamente. Quando o sensor não responder adequadamente a um dos seis incrementos efetuados, será considerado que sua resolução foi encontrada.

3.4.3 Análise de dados e modelo funcional

Após realizar todos os testes descritos acima e extrair a maior quantidade de parâmetros possíveis, um modelo funcional será desenvolvido em verilogA para descrever o comportamento DC do MTJ conectado em ponte. Este modelo visa ser utilizado em simulações de projetos de circuitos integrados.

Capítulo 4

Testes e extração de parâmetros

Este capítulo procura expor, da forma mais sucinta possível, informações que puderam ser extraídas a respeito dos sensores magnetorresistivos neste trabalho. Uma boa compreensão das vantagens e desvantagens oferecidas por cada tecnologia será proporcionada ao leitor através de gráficos, análises qualitativas e, algumas vezes, quantitativas.

4.1 Condições de contorno

Em virtude das limitações de instrumentação e das restrições impostas por alguns dos dispositivos utilizados, todos os parâmetros que serão apresentados neste capítulo foram extraídos dentro das seguintes condições de teste:

- Tensão de alimentação da placa: 5 V
- Tensão de alimentação dos sensores: 3,5 V
- Corrente máxima do condutor: +/- 1 A
- Distância aproximada entre condutor e o die do sensor: 0,6 mm
- Faixa de temperatura: -40 à 80 °C

Deste modo, todas as conclusões comportamentais obtidas neste estudo estarão restritas às condições de contorno mencionadas acima.

4.2 Extração de parâmetros

Através realização de cada um dos testes descritos na seção 3.4.2, a respeito de cada sensor, foi possível obter as seguintes informações: Característica tensão corrente, linearidade, sensibilidade, precisão, resolução, histerese e coeficiente de temperatura.

4.2.1 Característica tensão corrente

Mediante a realização do teste (1) Extração da curva característica, foi possível extrair a curva de tensão-corrente de cada um dos sensores. Algo importante a ser observado nestas curvas, é a faixa de corrente para qual o sensor entrega uma resposta linear em tensão. Esta faixa delimita a região de operação ideal para utilização destes dispositivos como sensor de corrente.

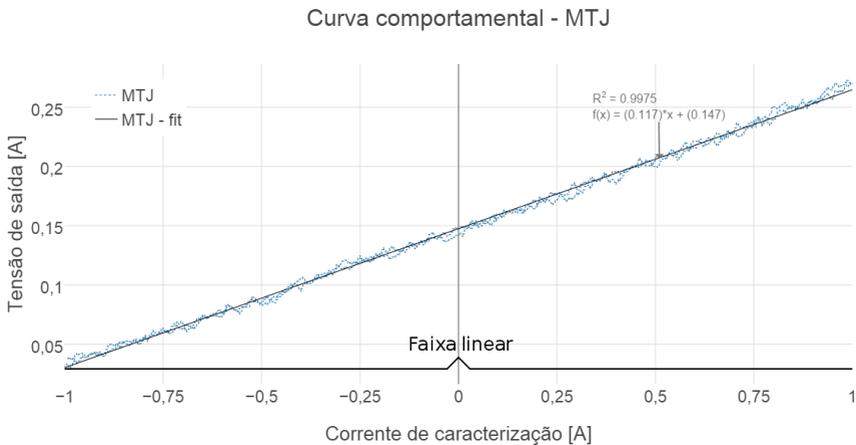


Figura 4.1: Característica tensão corrente do sensor MTJ

Nas figuras 4.1, 4.2 e 4.3 é possível observar que o MTJ tem uma faixa de operação linear muito maior do que os outros dois sensores. Na verdade, esta faixa se estende para todos os valores de corrente que os dispositivos foram testados, apontando uma das que podem ser a principal vantagem

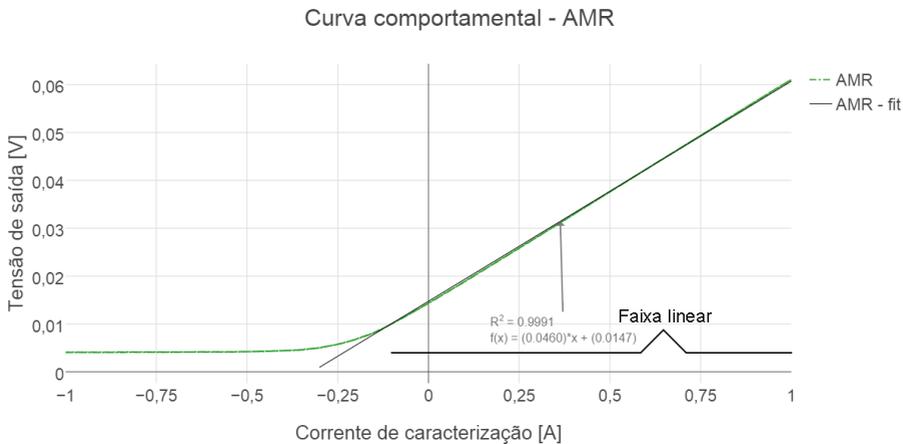


Figura 4.2: Característica tensão corrente do sensor AMR

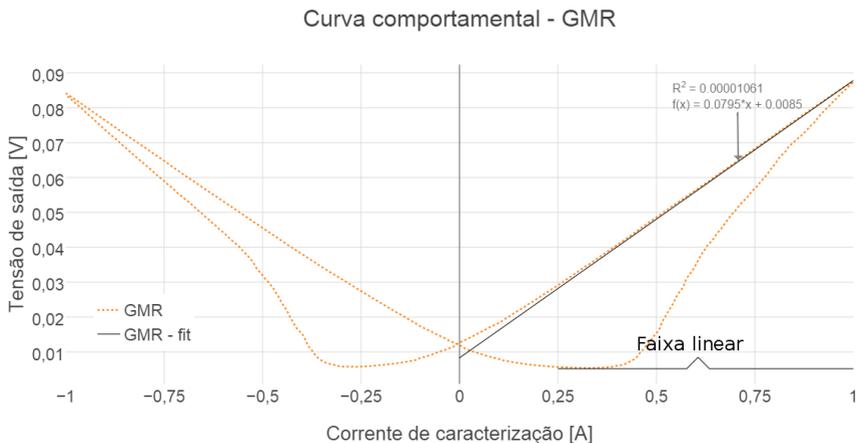


Figura 4.3: Característica tensão corrente do sensor GMR

oferecida pelo MTJ, larga faixa de operação.

O sensor AMR, assim como o MTJ, apresenta saída linear bipolar. No entanto, não é possível observá-la completamente devido a um efeito de cruzamento de eixo, que faz com que o zero não esteja no centro de sua curva. Ainda assim, dentro da faixa de medidas, o sensor apresenta uma

grande faixa de operação linear, de aproximadamente 1,1 A.

O sensor da tecnologia GMR, entrega ao consumidor final uma faixa de operação já muito menor que os outros dois, que vai de 250 mA a 1 A. É possível observar que esta mesma faixa é encontrada tanto no quadrante positivo quanto no quadrante negativo da curva. Isto não quer dizer que as faixas possam ser somadas, mas sim que este sensor não é capaz de detectar direção, pois responde da mesma maneira independente da direção da corrente/campo.

4.2.2 Sensibilidade

A sensibilidade de um sensor está relacionada ao sinal de saída produzido por um estímulo aplicado na entrada. Matematicamente, pode ser definida pela razão entre a variação do parâmetro de saída e a variação do parâmetro da entrada, no caso deste trabalho: $\Delta V / \Delta I$.

A sensibilidade de um sensor é dada pela inclinação da curva característica em sua região linear de operação. Nas figuras 4.1, 4.2 e 4.3, foram plotadas as equações de reta que definem esta região para cada um dos sensores. O coeficiente em x nestas equações define a inclinação da reta e, conseqüentemente, a sensibilidade do sensor.

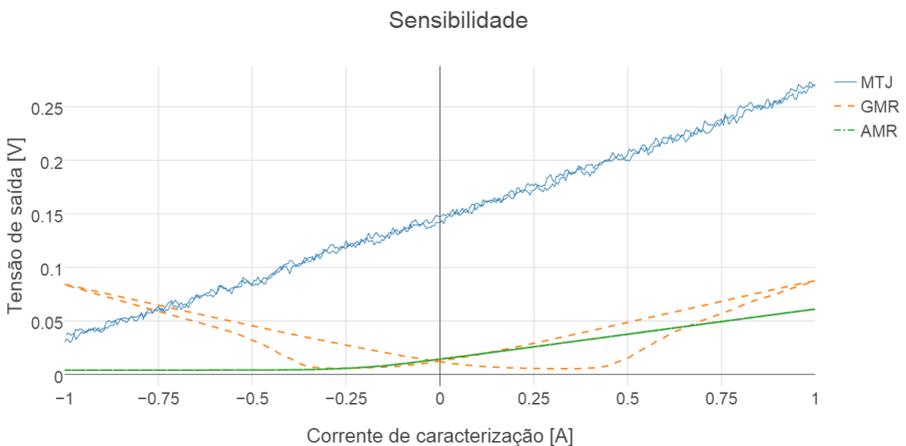


Figura 4.4: Característica tensão-corrente dos sensores AMR, GMR e MTJ

Na figura 4.4 foram plotadas juntas as curvas tensão-corrente dos três sensores, com o intuito de auxiliar o leitor a ter uma ideia qualitativa da diferença de sensibilidade que existe entre as tecnologias. Claramente, o MTJ foi o sensor que apresentou a maior sensibilidade, cerca de uma vez e meia maior que a do GMR e duas vezes e meia maior do que a do AMR. São elas: $S_{MTJ} = 0,117[V/A]$, $S_{GMR} = 0,0795[V/A]$ e $S_{AMR} = 0,0460[V/A]$.

4.2.3 Linearidade

A linearidade é conceitualmente definida em termos de percentagem de não linearidade, pois representa o quanto que a curva do sensor se desviou do comportamento ideal (linear). Quanto a este parâmetro, as figuras são mais do que esclarecedoras. É nítido que o MTJ apresenta a melhor linearidade, uma vez que a inclinação média de sua curva não muda em toda a faixa de -1 a 1 A, exceto pelas bruscas variações impostas pelo ruído. O sensor AMR também apresenta uma linearidade muito boa na faixa de -0,1 a 1 A; a reta plotada na figura 4.2 mostra que seu comportamento nesta faixa diverge muito pouco do ideal. O GMR, mesmo se analisado apenas para o quadrante positivo da curva, apresenta pior linearidade dentre os três. Não que a linearidade do sensor seja ruim, mas nessa faixa, seu comportamento é o que mais diverge do ideal.

4.2.4 Precisão

O conceito de precisão de um sensor está relacionado com sua repetibilidade. Idealmente, se um sensor for submetido a um mesmo teste diversas vezes, independente de quantas vezes forem, a resposta por ele apresentada será sempre a mesma. Porém, não é o que acontece na realidade; ao invés disso, as respostas que o sensor apresenta são apenas próximas umas das outras, existindo sempre uma faixa de respostas que ele pode dar a uma determinada entrada.

Portanto, para determinar a precisão de um sensor é necessário submetê-lo a um mesmo teste diversas vezes, e encontrar o desvio padrão das respostas obtidas para cada valor de entrada. Nas figuras 4.5, 4.6 e 4.7 são

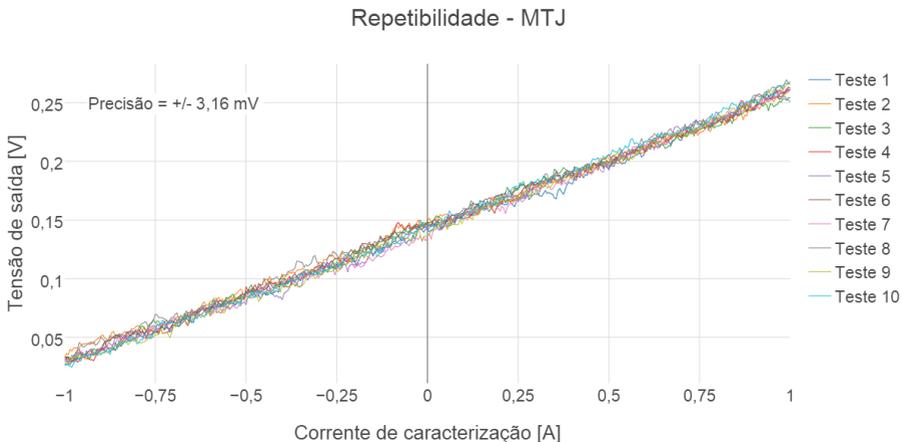


Figura 4.5: Gráfico de repetibilidade para determinar a precisão do sensor MTJ

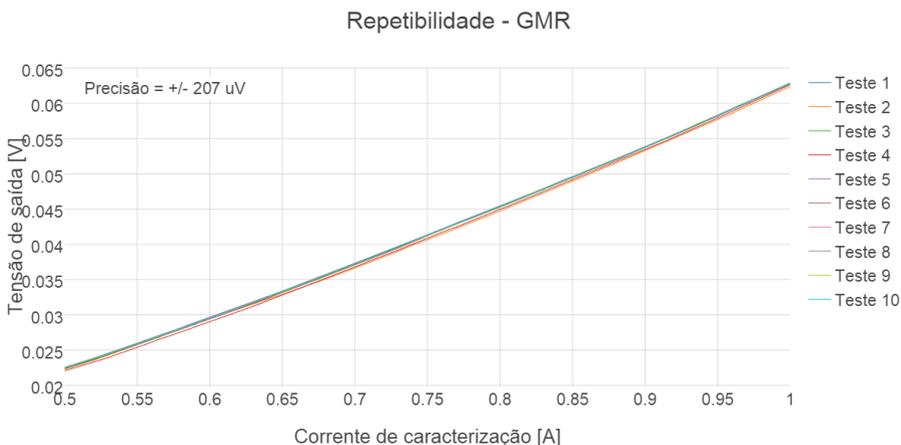


Figura 4.6: Gráfico de repetibilidade para determinar a precisão do sensor GMR

mostradas as curvas apresentadas pelos sensores quando submetidos a um mesmo teste dez vezes seguidas. Essas curvas são muito esclarecedoras pois, apesar da resolução da figura, é possível observar que as respostas não são sempre as mesmas. Ou seja, há um desvio entre as respostas e este desvio é utilizado para determinar a precisão do sensor.

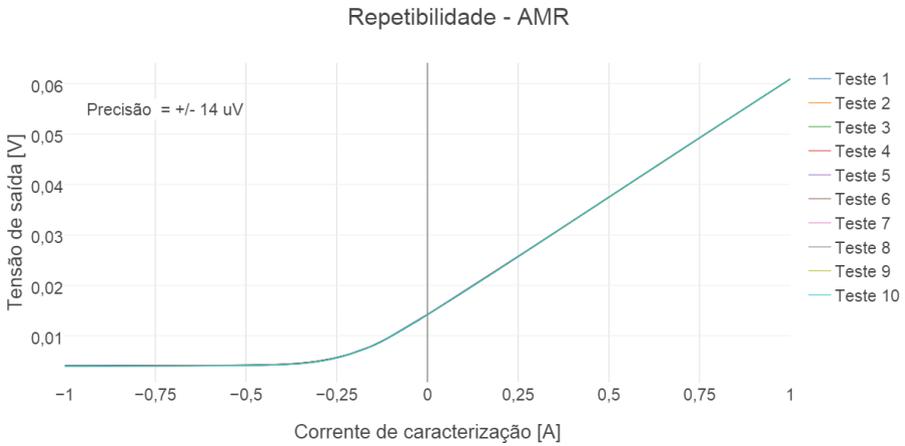


Figura 4.7: Gráfico de repetibilidade para determinar a precisão do sensor AMR

As figuras deixam claro que existe uma diferença de precisão muito grande entre as três tecnologias. Utilizando a equação 4.1 para determinar o desvio padrão das respostas, foi possível concluir que a precisão do AMR é cerca de quinze vezes maior que a do GMR e quase duzentos e trinta vezes maior do que a do MTJ. Os valores de precisão encontrados podem ser observados no canto superior esquerdo de cada gráfico de repetibilidade.

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad \text{onde } n = 10 \quad (4.1)$$

4.2.5 Resolução

A resolução define a menor variação incremental do parâmetro de entrada que pode ser detectada na saída. Neste caso, a mínima variação na corrente do condutor externo que produz uma diferença de tensão detectável na saída da ponte de Wheatstone. A resolução de um sensor depende basicamente de dois parâmetros: Sensibilidade e ruído.

O teste de resolução, que está bem descrito na seção 3.1.2, facilita a compreensão do que este parâmetro representa. Para facilitar a observação

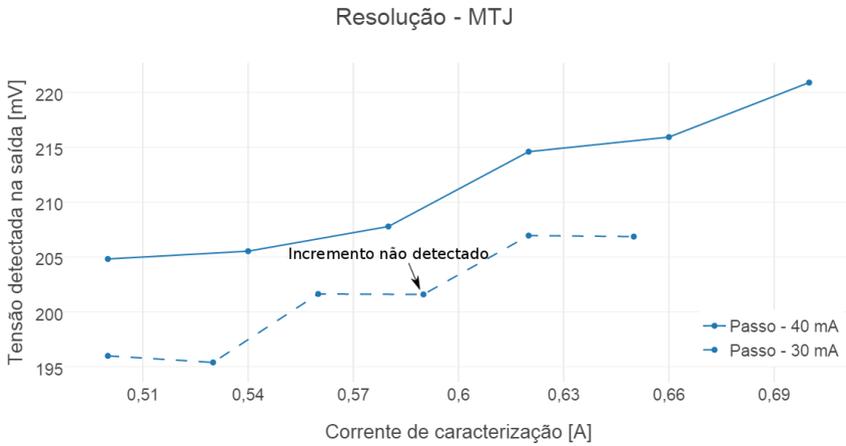


Figura 4.8: Resolução do sensor MTJ

da resposta que o sensor produz a cada incremento de corrente realizado, aumentou-se o ganho do amplificador diferencial de seis para cem vezes.

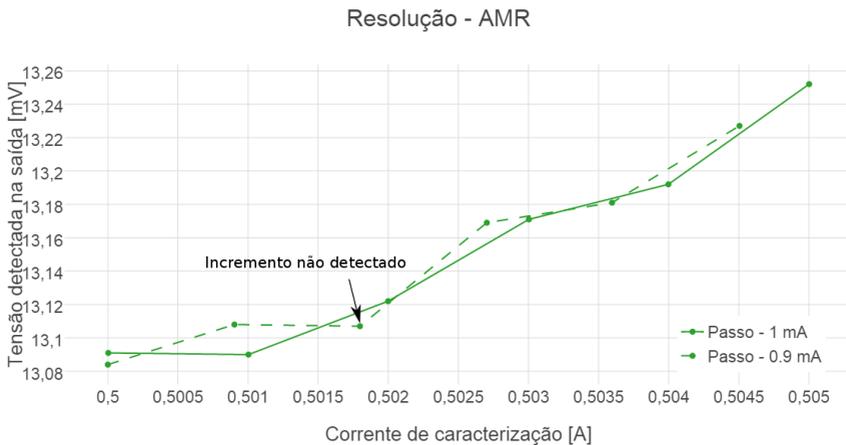


Figura 4.9: Resolução do sensor AMR

Dentre os três sensores, o MTJ foi o que apresentou pior resolução. Apesar de ser a tecnologia que apresenta a maior sensibilidade, seu alto ruído DC impede que passos únicos de incrementos pequenos possam ser detec-

tados, uma vez que sua resposta oscila em torno da amplitude de seu ruído. De acordo com a figura 4.8, a resolução do MTJ é de cerca de 40 mA.

O sensor AMR apresenta uma sensibilidade muito pior do que o MTJ, no entanto, seu ruído DC é muito baixo, e por isso, consegue detectar incrementos únicos de corrente na faixa de 1 mA (figura 4.9).

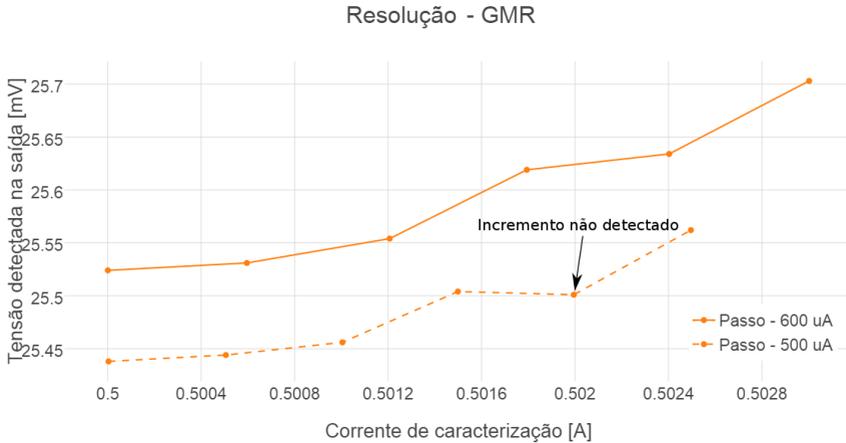


Figura 4.10: Resolução do sensor GMR

A tecnologia GMR é a que apresenta a segunda maior sensibilidade, perdendo apenas para o MTJ. É também a que apresenta a segunda melhor imunidade a ruído DC, perdendo apenas para o AMR. Esta combinação de fatores proporciona uma resolução extremamente alta, capaz de detectar variações de corrente de aproximadamente 500 uA, conforme mostrado na figura 4.10.

4.2.6 Histerese

Idealmente, para uma mesma entrada, um sensor deve sempre apresentar uma mesma saída, independente do sinal de entrada estar subindo ou descendo em sua amplitude. Entretanto, como foi mencionado no capítulo 2, sensores magnéticos exibem uma propriedade de memória magnética, isto é, seus dipolos têm a tendência de permanecer magnetizados, mesmo

após a remoção do campo externo. Essa tendência faz com que uma fração da magnetização gerada pelo campo fique retida no magnetorresistor, alterando o seu comportamento. Deste modo, a saída de um sensor magnético passa a depender não somente do valor do sinal de entrada, mas também de seu estado anterior.

Curva de histerese - GMR

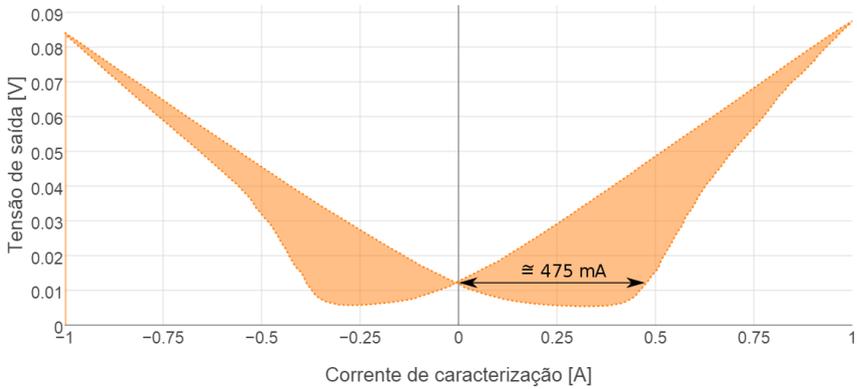


Figura 4.11: Histerese do sensor GMR

Curva de histerese - MTJ

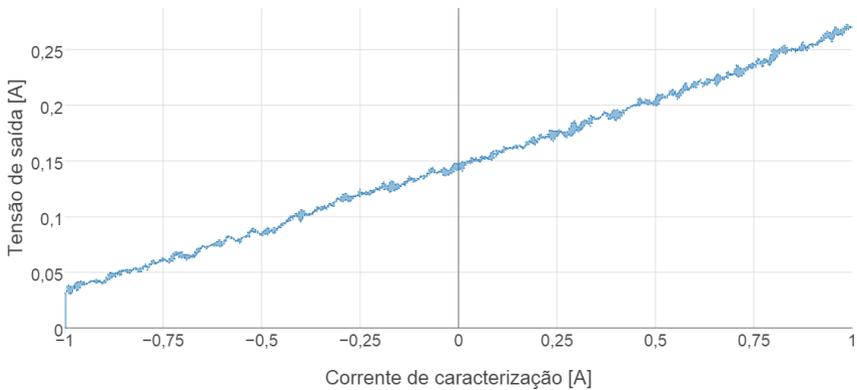


Figura 4.12: Histerese do sensor MTJ

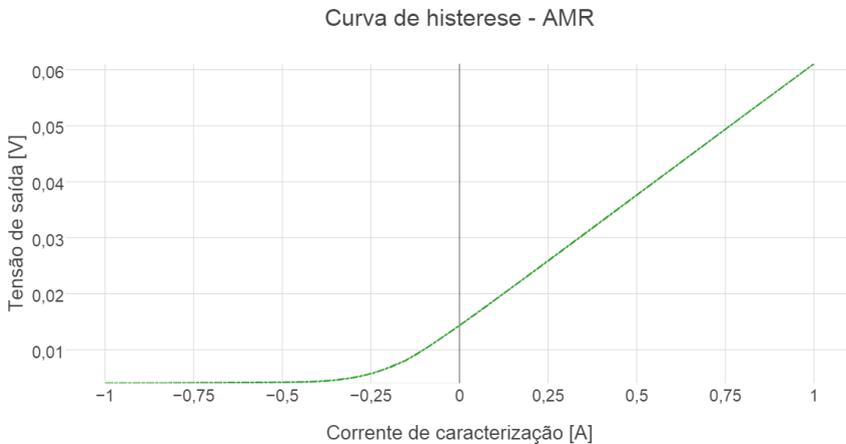


Figura 4.13: Histerese do sensor AMR

Para obter o valor da histerese é necessário fazer uma diferença entre os valores de entrada que produzem o mesmo sinal de saída. A maior diferença encontrada determinará o valor da histerese do sensor. O teste 1, descrito na seção 3.1.2, realizou uma varredura de corrente de -1 a 1A, ida e volta. Através dos resultados obtidos nesse teste é possível determinar a histerese de cada sensor.

Analisando as figuras 4.11, 4.13 e 4.12, percebe-se que, dentro das condições de teste estabelecidas, o único sensor a exibir histerese foi o GMR, de cerca de 475 mA. Tanto o AMR quanto o MTJ apresentaram histerese nula.

4.2.7 Coeficiente de temperatura

Todo material, inclusive os ferromagnéticos, apresenta alguma mudança em sua estrutura mediante variação de temperatura. Com os sensores magnetorresistivos não é diferente; a variação da temperatura acarreta em uma série de efeitos físicos internos que alteram de inúmeras formas seu comportamento. Neste trabalho, julgou-se importante analisar a influência da temperatura sobre a sensibilidade dos sensores.

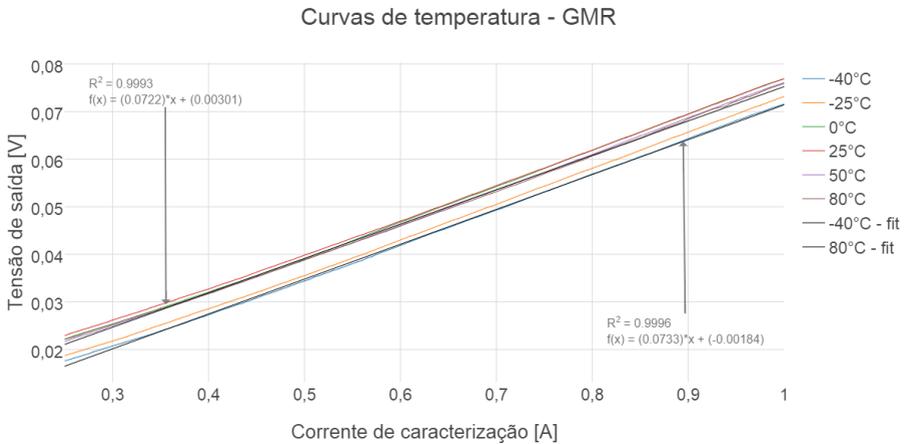


Figura 4.14: Curvas de comportamento do sensor GMR mediante à variação da temperatura.

Para realizar essa tarefa foi analisado o comportamento de cada sensor, dentro de sua faixa de operação linear, para seis diferentes temperaturas. Nas figuras 4.14, 4.15 e 4.16 é possível observar as respostas obtidas para cada valor de temperatura e também a inclinação máxima e mínima das curvas. A partir disto, definiu-se o coeficiente de temperatura dos sensores como sendo:

$$TC_{sens} = \frac{\Delta\theta}{\Delta T} \frac{100\%}{\theta_{nom}} \tag{4.2}$$

onde θ é a inclinação da reta.

Utilizando a equação 4.2, foi possível encontrar os seguintes valores de coeficiente de temperatura: $TC(AMR)_{sens} = -0,288\%/^{\circ}C$, $TC(MTJ)_{sens} = 0,0926\%/^{\circ}C$ e $TC(GMR)_{sens} = -0,0115\%/^{\circ}C$. Três importantes conclusões podem ser tiradas deste teste:(1) O MTJ é o único sensor a apresentar sensibilidade PTAT, ou seja, que aumenta com o aumento da temperatura; (2) O AMR apresenta o pior TC de sensibilidade, porém não tem offset; (3) O GMR é o sensor com maior estabilidade térmica.

Curvas de temperatura - MTJ

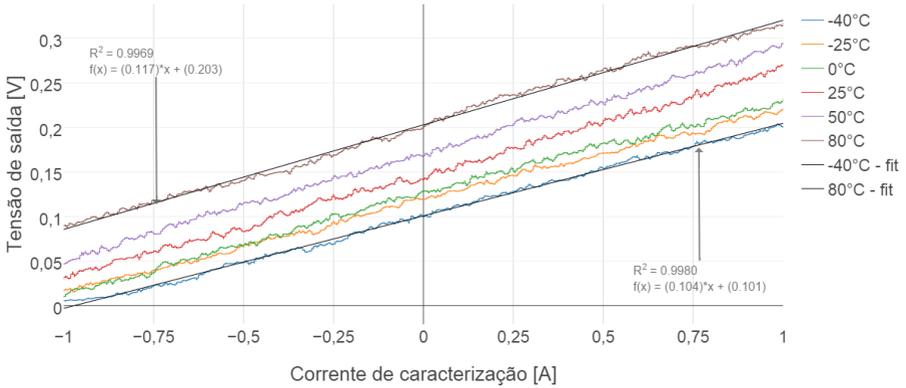


Figura 4.15: Curvas de comportamento do sensor MTJ mediante à variação da temperatura.

Curvas de temperatura - AMR

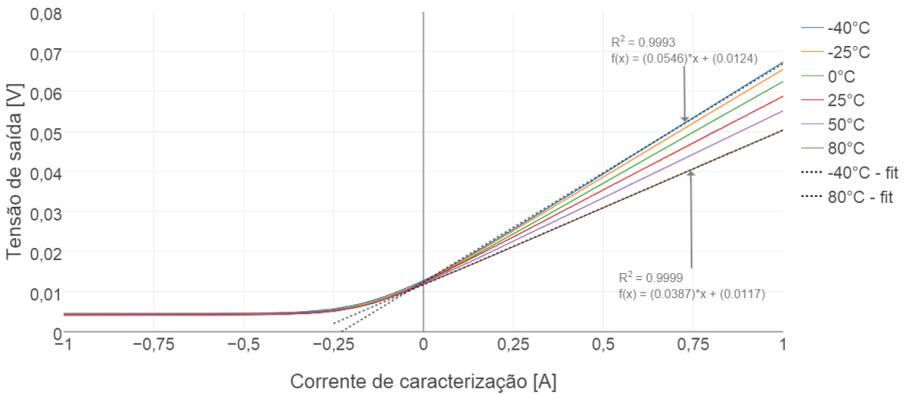


Figura 4.16: Curvas de comportamento do sensor AMR mediante à variação da temperatura.

Capítulo 5

Análise dos resultados

A tabela 5 é um resumo dos resultados obtidos neste trabalho, ela destaca os pontos fortes e fracos apresentados por cada tecnologia dentro das condições de teste estabelecidas. É possível observar que, mesmo estando em desvantagem por utilizar uma ponte de Wheatstone discreta, o MTJ apresentou resultados condizentes com o que a literatura diz a seu respeito e que demonstram grande potencial de mercado.

Grandeza	Tecnologias			Melhor desempenho	Unidade
	AMR	GMR	MTJ		
Faixa linear	1,1	0,75	2	MTJ	[A]
Sensibilidade	0,046	0,0795	0,117	MTJ	[V/A]
Precisão	14	207	3160	AMR	[μ V]
Resolução	0,5	1	40	GMR	[mV]
Histerese	-	475	-	AMR / MTJ	[mV]
TC _{sens}	-0,228	-0,0115	0,0926	GMR	[%/°C]

Tabela 5.1: Análise dos resultados obtidos para a faixa de corrente de -1 a 1 A

Faixa linear de operação, alta sensibilidade e também, baixo consumo de potência, são os pontos fortes apresentados pela tecnologia. Sua maior desvantagem é seu ruído DC, que apesar de não ter sido caracterizado, foi muito evidenciado pela degradação que causa na precisão e na resolução do sensor. Portanto, apesar do MTJ ser a tecnologia de sensores magnetorresistivos que apresenta maior sensibilidade, seu nível de ruído DC é tão alto que inviabiliza sua utilização na detecção e medição de pequenas variações de campo magnético.

Uma alternativa para contornar este problema seria a integração de um amostrador ao sensor MTJ. Neste caso, calcular-se-ia a média das medidas

realizadas pelo sensor em um pequeno intervalo de tempo antes que a resposta de medida fosse exibida. Esta condição possibilitaria a utilização do MTJ em uma série de novas aplicações que o AMR e o GMR não podem ser utilizados, que requerem sensores integráveis com alta sensibilidade, baixo consumo de potência, baixo custo e larga faixa de operação.

Logicamente, a utilização desta alternativa também trará algumas desvantagens. Além de um acréscimo na área e, conseqüentemente, no custo, a principal delas será a limitação da banda do sensor em metade da taxa de amostragem(nyquist); no entanto, em altas frequências, o ruído do MTJ é baixíssimo, descartando a necessidade de amostradores.

Capítulo 6

Modelo funcional

A partir dos dados obtidos neste trabalho, foi possível elaborar um modelo DC que descreve o comportamento do MTJ conectado em ponte de Wheatstone. Este capítulo visa apresentar o modelo e comparar os resultados de simulação com aqueles obtidos na bancada de testes.

6.1 Descrição comportamental

Com o intuito de desenvolver um modelo simples, porém realista, foram descartados os efeitos de ruído e incluídos apenas os efeitos de variação de sensibilidade e offset com temperatura. Para determinar os coeficientes de variação da sensibilidade e do offset, foram utilizadas as equações de reta obtidas no teste (3) da seção 3.4.2. Conforme mostrado na figura 6.1, a linguagem utilizada para a descrever o comportamento do sensor foi verilogA, enquanto que a implementação e a simulação do modelo foram realizadas no Cadence (software de CAD para projeto de circuitos integrados).

6.2 Resultados e comparações

A fim de verificar a qualidade do modelo, criou-se um símbolo para o dispositivo e realizou-se uma simulação DC, na qual foi feita uma varredura de corrente de -1 a 1 A, para as temperaturas de -40, -25, 0, 25, 50 e 80 °C, idêntica ao teste (3). Na figura 6.2, é possível observar o testbench dessa simulação. A corrente que passa pelos pinos i_{in} e i_{out} é responsável por gerar um campo magnético sobre o sensor, e é controlada pela fonte de

```

// Davi Figueiredo
// Modelo funcional do MTJ em ponte de Wheatstone
// VerilogA for mtj current sensor

`include "constants.vams"
`include "disciplines.vams"

// Declaracao dos pinos //

module mtj_model(gnd, i_in, i_out, vo, vsens);
inout gnd;
electrical gnd;
inout i_in;
electrical i_in;
inout i_out;
electrical i_out;
inout vo;
electrical vo;
inout vsens;
electrical vsens;

//Declaracao das variaveis //

real m_t;
real boff_t;
real temp_c;

analog begin

temp_c = $temperature - 273.15; // Transformacao de temperatura //
m_t = 0.000162*temp_c + 0.109; // Calculo do coeficiente de sensibilidade //
boff_t = 0.00082*temp_c + 0.132; // Calculo do coeficiente de offset //
V(vo,gnd) <+ (m_t*I(i_in,i_out) + boff_t);

end
endmodule

```

Figura 6.1: Descrição comportamental do MTJ em verilogA

corrente IDC. Uma tensão de 3,5V é aplicada sobre a ponte de Wheatstone pela fonte VDC, conforme observado no esquema da figura 6.2. A tensão vo equivale à saída do amplificador diferencial usado na medição.

Os resultados encontrados através da simulação do modelo podem ser

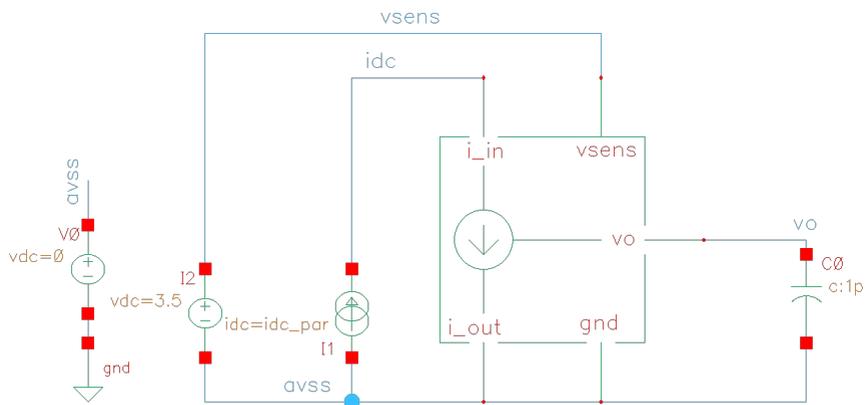


Figura 6.2: Testbench de simulação do modelo elaborado para o MTJ

observados na figura 6.3. Para facilitar a comparação entre os resultados de simulação e bancada, foram utilizados marcadores no gráfico para destacar as equações de reta das curvas tensão-corrente nas temperaturas máxima e mínima.

DC Temp - MTJ WHEATSTONE BRIDGE

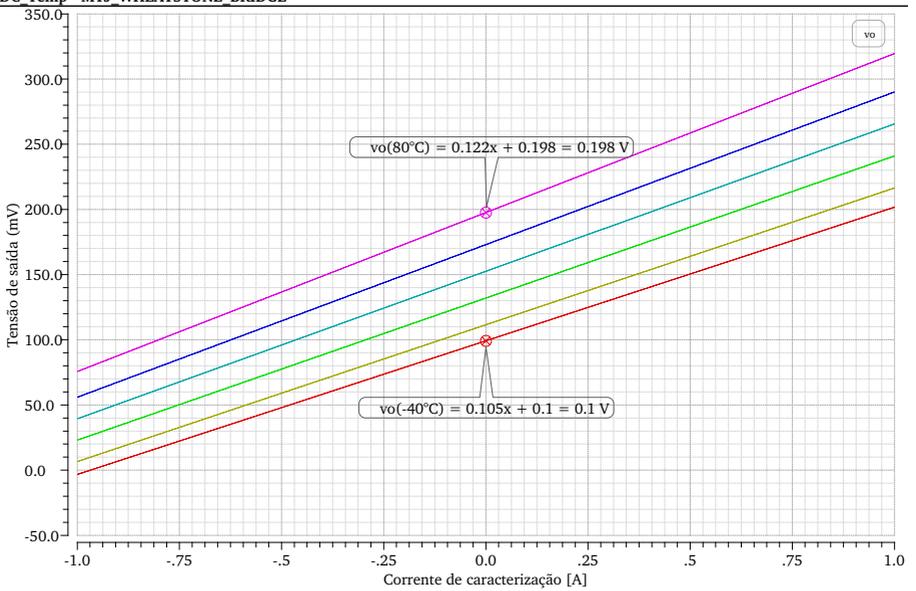


Figura 6.3: Curvas tensão-corrente do modelo MTJ variando a temperatura

Capítulo 7

Conclusão

A possibilidade de medir diversos parâmetros físicos através do sensoramento da intensidade e da orientação de campos magnéticos, desencadeou uma série de avanços tecnológicos. As aplicações dos sensores magnéticos são inúmeras, sendo raro encontrar um automóvel, computador, ou fábrica de alto desempenho que não os utilize hoje em dia. Isto tem estimulado cada vez mais o desenvolvimento e a descoberta de tecnologias que possam realizar medições com maior eficiência e melhor desempenho. A tecnologia de sensores magnéticos MTJ foi a última a ser desenvolvida e, recentemente, novos sensores utilizando este princípio de funcionamento vem sendo testados. Este trabalho contribui para o desenvolvimento de um desses novos sensores, apresentando um estudo do seu comportamento DC e desenvolvendo um modelo funcional para realização de simulações.

Com o intuito de dar maior relevância ao estudo e tornar aparente as vantagens e desvantagens desta tecnologia de magnetorresistores, este trabalho de conclusão de curso apresenta uma comparação entre ela e as outras duas de maior visibilidade no mercado, a AMR e a GMR. Esta tarefa foi realizada através da confecção de uma PCI, onde os três sensores puderam ser submetidos a uma série de testes e diversos parâmetros puderam ser observados.

Os resultados obtidos nos testes mostraram que todas as tecnologias apresentam vantagens e desvantagens, e nenhuma delas pode ser descartada. Em relação ao MTJ, foi possível observar que ele iguala ou supera as outras tecnologias em termos de sensibilidade, faixa de operação, histerese, consumo de potência e, teoricamente, em área. Infelizmente, se não for realizado nenhum condicionamento do seu sinal de saída, o nível de ruído DC

que ele apresenta inviabilizará sua utilização em aplicações que necessitem alta resolução e precisão.

Duas são as sugestões para a continuidade deste trabalho: A primeira é a realização da caracterização do ruído dos sensores, tanto DC quanto em altas frequências, para verificar exatamente a banda de melhor funcionamento do MTJ e a densidade de ruído por ele apresentada em todo o espectro. Outra sugestão, um pouco mais elaborada, seria a confecção de um circuito integrado, onde quatro estruturas MTJ pudessem ser conectadas em ponte de Wheatstone e o sinal diferencial de saída fosse amostrado em uma dada frequência, visando aumentar a detectividade do sensor.

Bibliografia

- [1] Lenz, J.; Edelstein, Alan S. Magnetic Sensors and Their Applications *Journal of Astronautical Sciences*, Volume: 6, Issue: 3, 2006. Disponível em <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1634415>>
- [2] Rezende, Sergio M. Materiais e dispositivos eletrônicos/ Sergio M. Rezende – 2.ed – São Paulo: Editora Livraria da Física,2004.
- [3] Wikipedia, 2015 “Magnetic field”. Disponível em <https://en.wikipedia.org/wiki/Magnetic_field#The_H-field>
- [4] Zafer, T.; Mustafa ERO. “Students’ Difficulties in Understanding the Concepts of Magnetic Field Strength, Magnetic Flux Density and Magnetization”. *Lat. Am. J. Phys. Educ.* Vol. 2, No. 3, Sept 2008. Disponível em <http://www.lajpe.org/sep08/04_Zafer_Tanel.pdf>
- [5] Kuang, K. Magnetic Sensors - Principles and Applications; Publisher: In-Tech, 2009. Disponível em <<http://www.intechopen.com/books/magnetic-sensors-principles-and-applications>>
- [6] Transparency Market Research: Magnetic Field Sensors Market - Global Industry Analysis, Size, Share, Growth, Trends and Forecast 2015 - 2021. Disponível em <<http://www.transparencymarketresearch.com/magnetic-field-sensors-market.html>>
- [7] Schmitt, Ron. Electromagnetics explained. 2002. Retrieved 16 July 2010.
- [8] Luna, Aelfo Marques. Materiais de Engenharia Elétrica - Revisão das propriedades dos materiais - Estudo dos dielétricos. Vol.1, Junho de 2006.
- [9] Jander, A; Smith, C; Schneider, R. - Magnetoresistive Sensors for Nondestructive Evaluation - *Presented at the 10th SPIE Inter-*

national Symposium, Nondestructive Evaluation for Health Monitoring and Diagnostics, Conference 5770, 2005. Disponível em <http://www.nve.com/Downloads/SPIE10_Magnetoresistive_Sensors_for_Nondestructive_Evaluation.pdf>

- [10] Duan, Feng; Guojun Jin - *Introduction to Condensed Matter Physics*. Vol 1, 2005
- [11] W. Thomson, "On the electro-dynamic qualities of metals: Effects of magnetization on the electric conductivity of nickel and iron," *Proc. Roy. Soc.*, vol.8, pp. 546 - 550, 1857.
- [12] R. S. Popovic; P. M. Drljaca; C. Schott. - *Bridging The Gap Between AMR, GMR, And Hall Magnetic Sensors - 23rd INTERNATIONAL CONFERENCE ON MICROELECTRONICS(MIEL 2002)*. Vol 1, Yugoslavia, 2002.
- [13] M. N. Baibich; J. M. Broto; A. Fert; F. N; V. Dau; F. Petroff; P. Eitenne; G. Creuzet; A. Friederich and J. Chazelas, "Giant Magnetoresistance of (001)Fe/(001)Cr Magnetic Superlattices," *Phys. Rev. Lett*, vol. 61, pp. 2472-2475, 1988
- [14] E. Y. Tsymbal; D. G. Pettifor - *Perspectives of Giant Magnetoresistance - University of Nebraska, Research Papers in Physics and Astronomy*, 2001. Disponível em <<http://digitalcommons.unl.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1049&context=physics>>
- [15] J.M. Daughton - *GMR applications - Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol 192, 1998.
- [16] M.Jullière, *Tunneling between ferromagnetic films*, *Phys. Lett. A* 54, 225-226, 1975.
- [17] S. Maekawa and O.Gafvert, *Electron tunneling between ferromagnetic filmes*, *IEEE trans. Magn*, MAG 18, 707-708, 1982.
- [18] T. Y. Evgeny; Z. Igor - *Handbook of spin transport and magnetism*. CRC Press, 2012.

- [19] S. Ikeda; J. Hayakawa; Y. Ashizawa et al., Tunnel magnetoresistance of 604% at 300K by suppression of Ta diffusion in CoFeB/MgO/CoFeB pseudo-spin-valves annealed at high temperature, Appl. Phys. Lett, 082508, 2008.
- [20] Whittaker, E. T, A History of the Theories of Aether and Electricity, 1910.
- [21] Keysight Technologies - B2900A Series - Precision Source/Measure Unit - Datasheet. Disponível em <<http://literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/5990-7009EN.pdf?id=2035016>>
- [22] W. Gopel; J. Hesse; J. N. Zemel - Sensors A Comprehensive Survey, Magnetic Sensors. Vol 5, 1989.
- [23] NVE CORPORATION - AA and AB-Series Analog Sensors. "Datasheet do sensor GMR". Disponível em <<http://datasheet.octopart.com/AA003-02E-NVE-datasheet-129884.pdf>>
- [24] Honeywell - 1 and 2 axis Magnetic Sensor HMC1001/1002/1021/1022. "Datasheet do sensor AMR" Disponível em <<http://datasheet.octopart.com/HMC1022-TR-Honeywell-datasheet-8553707.pdf>>
- [25] Burr-Brown Corporation - INA122 Single Supply MicroPOWER INSTRUMENTATION AMPLIFIER. "Datasheet do amplificador". Disponível em <<http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/56680/BURR-BROWN/INA122.html>>