



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO

CENTRO ACADÊMICO DO AGRESTE

NÚCLEO DE FORMAÇÃO DOCENTE

FÍSICA-LICENCIATURA

WAGNER PINHEIRO DOS SANTOS

**PROPOSTA EXPERIMENTAL PARA LABORATÓRIO DE FÍSICA MODERNA:
CONSTRUÇÃO DE UMA MONTAGEM EXPERIMENTAL PARA A VISUALIZAÇÃO
DE EFEITOS NA RESISTÊNCIA ELÉTRICA DE MATERIAIS
FERROMAGNÉTICOS**

Caruaru

2019

WAGNER PINHEIRO DOS SANTOS

**PROPOSTA EXPERIMENTAL PARA LABORATÓRIO DE FÍSICA
MODERNA: CONSTRUÇÃO DE UMA MONTAGEM EXPERIMENTAL PARA
A VISUALIZAÇÃO DE EFEITOS NA RESISTÊNCIA ELÉTRICA DE
MATERIAIS FERROMAGNÉTICOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Licenciatura em Física da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de graduação/Licenciatura em Física.

Área de concentração: Ensino de Física Moderna.

Orientador: Prof. Dr. Luiz Henrique Vilela Leão.

Caruaru
2019

Catálogo na fonte:
Bibliotecária – Simone Xavier - CRB/4 - 1242

S237p Santos, Wagner Pinheiro dos.
Proposta experimental para laboratório de física moderna: construção de uma montagem experimental para a visualização de efeitos na resistência elétrica de materiais ferromagnéticos / Wagner Pinheiro dos Santos. - 2019.
40 f. il. : 30 cm.

Orientador: Luiz Henrique Vilela Leão.
Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Universidade Federal de Pernambuco, CAA, Licenciatura em Física, 2019.
Inclui Referências.

1. Física moderna. 2. Laboratório de física. 3. Física – Estudo e ensino. 4. Álgebra.
I. Leão, Luiz Henrique Vilela (Orientador). II. Título.

CDD 371.12 (23. ed.) UFPE (CAA 2019-419)

WAGNER PINHEIRO DOS SANTOS

**PROPOSTA EXPERIMENTAL PARA LABORATÓRIO DE FÍSICA
MODERNA: CONSTRUÇÃO DE UMA MONTAGEM EXPERIMENTAL PARA
A VISUALIZAÇÃO DE EFEITOS NA RESISTÊNCIA ELÉTRICA DE
MATERIAIS FERROMAGNÉTICOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Física-Licenciatura da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de licenciatura em Física.

Aprovada em: 30/01/2019.

BANCA EXAMINADORA

Prof^o. Dr. Luís Henrique Vilela Leão (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof^o. Dr. Gustavo Camelo Neto (1^o Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof^a. Dr^a. Augusto César Lima Moreira (2^o Examinadora Interna)
Universidade Federal de Pernambuco

Dedico este trabalho a minha mãe que com muito esforço possibilitou minha formação como pessoa. E agradeço por ser minha base e minha maior motivação.

AGRADECIMENTOS

Com esse trabalho encerra um ciclo na minha vida, e nessa caminhada só tenho a agradecer a todos que caminharam e fizeram parte dessa jornada.

Gostaria de agradecer primeiro a Deus por me iluminar e me dar forças para continuar minha trajetória acadêmica.

Gostaria de dar mesmos agradecemos:

Ao meu orientador, Professor Luiz Leão, pela amizade, compreensão e companheirismo neste trabalho, quanto na trajetória acadêmica. Muito obrigado pela paciência e compreensão.

A minha mãe Quitéria Corina, que lutou muito para hoje eu chegasse a este ponto.

A Glenda pela ajuda nessa caminhada.

Aos meus amigos Everaldo Sebastião, Deivisson Mota, Bruno Andrade, Caio Lira, Ivan Marcio, Miler, Jessie, Rai, Pedro Ivo (Pedrão), Luciano (Lulu), Issac, e Deivid Rodrigo. Amigos que obtida na graduação em Física e que estiveram presentes nessa trajetória e participaram de forma significativa para minha formação.

Aos meus amigos que obtive durante o projeto de Extensão Superação do Campus CAA. Luciano Flávio, Danilo Silva, e Mayara Leticia. Muito obrigado pela amizade e por todas as experiências marcantes vivências no projeto durante esses anos.

Aos alguns professores que participaram da minha formação docente, gostaria de agradecer a Charlie Salvador, Augusto Cesar, Gustavo Camelo, Sergio Campelo, João Libertado, João Eduardo Ramos, Paulo Peixoto, e Luis Leão.

Ao pessoal do Departamento de Física da UFPE, gostaria de agradecer a Holanda, Obed, Pablo, Daniel e Marcos. Em especial, aos professores Antônio Azevedo, Sergio Rezende e Fernando Machado.

Ao CNPq pelo apoio.

O compromisso cego
com uma teoria não é uma
virtude intelectual: é um
crime intelectual.

Imre Lakatos

RESUMO

Este trabalho apresenta uma proposta experimental sobre efeitos e fenômenos de Física Moderna e Contemporânea presentes no século XXI. Especialmente, para disciplinas de Laboratório de Física Moderna, onde tal arranjo experimental pode proporcionar possíveis contribuições para o estudo de fenômenos relacionados com a interação de spin-órbita, como magnetorresistência anisotrópica (AMR), e com as propriedades de materiais magnéticos, em filmes e bicamadas nano-estruturadas, tais como, bicamadas metal normal/ metal ferromagnético. Para realização de tais estudos, neste trabalho foi construído um aparato experimental e realizado testes em amostras de *Permalloy*. Os resultados obtidos foram analisados de forma fenomenológica. Ainda neste trabalho foi feita uma revisão literária sobre os principais fenômenos correlacionados com a temática, por exemplo, a resistência elétrica em amostras magnéticas, Efeito Hall Normal e magnetorresistência Anisotrópica (AMR). Em seguida, são apresentados os objetos gerais da pesquisa, ou seja, a construção e automação do arranjo experimental, e a realização de medidas em bicamadas magnéticas. Feito isto, em seguida está descrito os detalhes da técnica experimental utilizada para medir a magnetorresistência. Em relação aos resultados obtidos, primeiramente foram realizados testes de uma amostra convencional, neste caso, foi utilizada uma bicamada de *Py(10nm)/Cu(1nm)* depositada a 50 graus do plano. Após análises fenomenológicas foi observado o efeito de magnetorresistência anisotrópica na amostra estudada.

PALAVRAS CHAVE: Laboratório de Física Moderna. Magnetorresistência Anisotrópica (AMR). Interação Spin-órbita. Ensino de Física.

ABSTRACT

This work presents an experimental proposal on the effects and phenomena of Modern and Contemporary Physics present in the XXI century. Especially, for Modern Physics Laboratory subjects, where such experimental arrangement can provide possible contributions for the study of phenomena related to the spin-orbit interaction, such as anisotropic magnetoresistance (AMR), and the properties of magnetic materials, in nano-structured films and bilayers, such as normal metal / ferromagnetic metal bilayers. For the accomplishment of this work an experimental apparatus was constructed and tests were performed on Permalloy samples. The results obtained were analyzed in a phenomenological way. Also in this work, a review was made about the main phenomena related to the subject, for example, the electrical resistance in magnetic samples, Hall effect and Anisotropic magnetoresistance (AMR). Then, the general objects of the research are presented, that is, the construction and automation of the experimental arrangement, and the realization of measurements in magnetic bilayers. In relation to the obtained results, tests were performed in a conventional sample Py (10nm) / Cu (1nm). After phenomenological analyzes, the effect of anisotropic magnetoresistance was observed in the sample studied.

KEYWORDS: Modern Physics Laboratory. Anisotropic Magnetoresistance (AMR). Spin-orbit interaction; Physics teaching.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	13
2.1	Uma breve discursão sobre Ensino de Física Moderna.....	13
2.2	Resistência elétrica.....	17
2.3	Efeito Hall normal.....	19
2.4	Magnetorresistência Anisotrópica (AMR)	21
3	METODOLÓGIA.....	26
3.1	O Arranjo experimental.....	26
3.2	Construção da ponte de Wheatstone com amplificador diferencial	31
4	ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	34
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	37
	REFERÊNCIAS	38

1 INTRODUÇÃO

A eletrônica convencional baseia-se no uso/controle do movimento dos elétrons entre os eletrodos por meio da ação de um campo elétrico sobre sua carga elétrica. Além de carga elétrica e massa, os elétrons têm outra propriedade intrínseca, o *spin* (palavra em inglês que significa girar em torno de si mesmo). Como o elétron tem carga, ao *spin* está associado um momento magnético, o qual se comporta como uma minúscula agulha magnética, tendendo a se alinhar na direção de um campo magnético a ele aplicado. Nos últimos anos foram descobertos novos fenômenos em filmes magnéticos muito finos que mostraram a possibilidade de controlar o movimento dos elétrons através de um campo magnético atuando sobre o *spin*. As diversas aplicações desses fenômenos na eletrônica estão dando origem a um novo ramo da tecnologia, chamado “**Spintrônica**”, no qual as funções dos dispositivos são baseadas não apenas no transporte de cargas elétricas, como é o caso da eletrônica convencional, mas na utilização do *spin* eletrônico.

Atualmente os materiais magnéticos desempenham papel muito importante nas aplicações tecnológicas. Uma aplicação tradicional dos materiais magnéticos, que adquiriu grande importância nas últimas décadas, é a **gravação/leitura magnética, por exemplo, em HDs de computadores**. Na última década, a tecnologia de leitura magnética foi revolucionada com a introdução de “cabeças” magneto-resistivas, baseadas no efeito de magneto-resistência gigante, um dos fenômenos mais importantes da spintrônica.

Nos últimos anos foram descobertos vários fenômenos de transporte dependentes de *spin* que ocorrem em nano-estruturas com filmes de materiais magnéticos e não magnéticos. Dentre eles destacam-se o efeito de *spin*-pumping (SPS), o efeito *spin* Hall (Spin Hall Effect-SHE), o efeito *spin* Hall inverso (Inverse Spin Hall Effect-ISHE), o efeito *spin* Seebeck (Spin Seebeck Effect-SSE), o efeito Rashba, etc. Esses fenômenos possibilitam a conversão de um tipo de corrente de transporte em outro, seja de carga elétrica, de *spin* ou de calor, o que abre muitas novas possibilidades na área de Spintrônica (VILELA-

LEÃO, 2010; OLIVEIRA, 2005; HALL,1879; RIJKS e LENCZOWSKI,1997; THOMSON, 1857.)

A grande maioria destes novos efeitos são associados em sua origem a interação spin-orbital, ou seja, na interação do spin dos elétrons com seu movimento. Esse tipo de acoplamento ocorre principalmente em metais pesados, como Pt e Ta e em materiais ferromagnéticos. Esse efeito tem atraído grande atenção, pois exhibe grande potencial para aplicação em dispositivos lógicos magnéticos, onde a direção de magnetização é controlada pela passagem de uma corrente elétrica. A interação spin-orbita pode tanto induzir um campo magnético efetivo, como um torque sobre a magnetização. Apesar de se saber que a origem destes efeitos está ligada ao acoplamento spin-orbita, distinguir os mecanismos ligados ao fenômeno (por exemplo, efeito Hall de spin ou Rashba) é um grande desafio da pesquisa básica atual. Buscar novos materiais e métodos que otimizem as características de interesse para aplicações tem demandado um grande esforço das indústrias de tecnologia atualmente.

Com base nas linhas anteriores, é notório a importância das implicações de tais fenômenos frente as novas tendências tecnológicas. Porém, apesar da sua relevância, muitos desses fenômenos não são devidamente explorados em disciplinas de Física Moderna e Contemporânea, e de Laboratório de Física Moderna durante a graduação (OSTERMANN e MOREIRA, 2000; PEREIRA e OSTERMANN, 2009) o que, por sua vez, acaba limitando a ampliação de campo conceituais de FMC do aluno em sua formação acadêmica. E nesta perspectiva, surge uma pergunta que retoma as discussões sobre os cursos de formação de Física e sobre o perfil de disciplinas a complementar a formação do futuro professor: Como inserir o estudo ou apresentação de fenômenos, aparentemente complexos, como a interação spin-órbita que é de natureza relativística em disciplinas de Laboratório de Física Moderna e Contemporânea?

Na busca de uma proposta de resolução para a questão acima, este trabalho teve como objetivo a construção de uma montagem experimental para o estudo da interação spin-orbita, apresentada no fenômeno da magnetorresistência anisotrópica, em bicamadas nano-estruturadas metal

normal / metal ferromagnético (NM/FM), tal como, tais como, a bicamada Cobre/Permalloy, onde Py é uma liga Ni₈₀Fe₂₀. O experimento usará uma montagem experimental capaz de aplicar campo magnético, corrente elétrica AC e DC através da amostra e de medir a resistência da amostra em função do campo magnético. Uma tensão elétrica será medida e através destes valores serão extraídos os parâmetros de interesse a serem analisados, tais como, campos magnético internos induzidos e torque magnéticos, os quais, por sua vez, estão relacionados aos mecanismos envolvendo a interação spin-órbita.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo, será apresentada uma breve discussão dos temas e conceitos envolvidos na proposta deste trabalho, isto é, apresentar um panorama sobre o ensino de Física Moderna e Contemporânea e, em seguida, apresentar conceitos sobre os efeitos e fenômenos físicos propostos neste trabalho. Cabe salientar que para realização de análises fenomenológicas das técnicas experimentais desenvolvidas e realizadas neste trabalho deve-se compreender alguns fenômenos físicos e métodos de medição de resistência elétrica em materiais magnéticos. As seções posteriores são dedicadas a fazer uma revisão literária sobre o ensino de Física Moderna e Contemporânea (FMC) e também sobre os principais mecanismos responsáveis pela resistência elétrica em filmes e multicamadas magnéticas. Neste trabalho foram analisadas bicamadas nano-estruturadas (metal normal pesado) / (metal ferromagnético) (NM/FM). Nas linhas subsequentes, após uma breve discussão sobre Ensino de Física Moderna, serão definidos os seguintes fenômenos: Resistividade Ôhmica, os Efeitos Hall Normal e Hall Anômalo, e Magnetorresistência anisotrópica (AMR);

2.1 Uma breve discussão sobre Ensino de Física Moderna

Para realizar a busca de contribuições no ensino de Física de forma geral, é necessário compreender mesmo que superficialmente, um panorama geral de como está o ensino de Física, no século XXI, só esboçando aspectos de tal objeto haverá possibilidades de análise e melhorias do ensino.

Na literatura é frequentemente apresentado os obstáculos enfrentados na carreira docente, como por exemplo, a má remuneração, a precariedade das escolas públicas, a violência frequente dentro e fora da sala de aula, a falta de uma formação continuada de qualidade dos professores, a falta de estrutura e equipamento de ensino, tais como, laboratório didáticos,

próprio material didático entre outros. (SOUZA e GRANDINI, 2003; MOREIRA, 2000, TERRAZAN, 1992).

Segundo Costa e Barros (2015):

No país, especialmente na escola pública, o ensino de ciências físicas e naturais ainda é fortemente influenciado pela ausência do laboratório de ciências, pela formação docente descontextualizada, pela indisponibilidade de recursos tecnológicos e pela desvalorização da carreira docente. (COSTA e BARROS, 2015.)

Através de tantos empecilhos, a carreira docente, que é o pilar tanto para todas as profissões, quanto para a formação de modo geral dos cidadãos, têm seu brilho ofuscado, gerando a desmotivação e perda da identidade docente dos professores.

Em relação às vivências dentro do âmbito escolar, a sala de aula muitas vezes é palco de aulas expositivas, baseada em roteiros dirigidos quase sempre pelos livros didáticos. Nesse cenário, o aluno é colocado como agente passivo no processo de ensino e aprendizagem com o professor incorporando o papel principal nessa grande construção, ou seja, ocorre uma centralização no docente, durante o processo.

Entretanto, o modelo de aula citado anteriormente é desatualizado frente às novas realidades sociais e tecnológicas. E em consequência disto, os alunos perdem ao longo do tempo o interesse pela disciplina de Física, eles encontram dentro de sala de aula objetos de conhecimento que de nada servem para suas vidas fora da escola. Com isso, o estudante do ensino básico vai, no decorrer das vivências escolares, desconstruído interesse pelas Ciências da Natureza, pelo simples fato que é lhe apresentado com pouco ou nenhuma aplicação para seu cotidiano.

Em relação às linhas anteriores, fica evidenciado a necessidade de atualização do ensino de Física. E entre as inúmeras necessidades educacionais, imediatas ou de médio e longo prazo, justifica-se a relevância da incorporação de temáticas envolvendo conhecimentos além da fronteira dos clássicos tradicionalmente desenvolvidos há várias décadas no ensino médio. (JUNIOR e DE SOUZA CRUZ, 2009).

Entretanto, surge numerosos empenhos sobre o ensino de Física Moderna e Contemporânea (FMC) e é frequente encontramos na literatura, trabalhos de pesquisa em ensino de Física sobre essa temática (OSTERMANN e MOREIRA, 2000; PEREIRA e OSTERMANN, 2009; JUNIOR e DE SOUZA CRUZ, 2009; TERRAZZAN, 1992.). É importante destacar que a maioria das pesquisas encontradas focam principalmente em como inserir o ensino de FMC no Ensino Médio, apresentando diversas discursões, propostas didáticas e metodologias.

Para o ensino médio, segundo Moreira (2014), “O ensino da Física na educação contemporânea é desatualizado em termos de conteúdos e tecnologias” (MOREIRA, 2014.). Além disto, temos que a grade curricular muitas vezes está desatualizada em relação as temáticas propostas, como por exemplo, a falta de discussão sobre os limites da validação das leis de Newton. Entre as diversas “divisões” de conteúdo, muitas vezes as áreas abordadas abrangem quase que exclusivamente a Física Clássica, temos como exemplo: Mecânica, Termologia, Ondas, Óptica e Eletromagnetismo. Infelizmente, muitas vezes conteúdos voltados à Física Moderna e Contemporânea são poucos explorados ou praticamente excluídas no ensino médio. Feito isto, muitos estudantes concluem o ensino básico sem ter contato com tais conceitos e saberes sobre a Física Moderna.

Para Terrazzam (1992), é tendenciosa a atualização do currículo de Física frente às influências crescentes dos conteúdos contemporâneos para a compreensão do mundo em uma sociedade tecnológica, bem como a necessidade de formação de um cidadão crítico, consciente e atuante em sociedade. O mesmo afirma que:

Aparelhos e artefatos atuais, bem como fenômenos cotidianos em uma quantidade muito grande, somente são compreendidos se alguns conceitos estabelecidos a partir da virada deste século forem utilizados. A influência crescente dos conteúdos de Física Moderna e Contemporânea para o entendimento do mundo criado pelo homem atual, bem como a inserção consciente, participativa e modificadora do cidadão neste mesmo mundo, define, por si só, a necessidade de debatermos e estabelecermos as formas de abordar tais conteúdos na escola de 2º grau. (TERRAZZAM, 1992)

Segundo Ostermann e Moreira (2000), são inúmeras as razões para a introdução de tópicos de Física Moderna e Contemporânea na escola de modalidade de ensino básico. Podemos citar algumas motivações, tais como: despertar a curiosidade dos estudantes e ajudá-los a reconhecer a Física como um empreendimento humano e, portanto, os estudantes darão mais sentido à Física, fazendo relações com o mundo que o cerca; estabelecer o contato dos alunos com as ideias revolucionárias que mudaram totalmente a Ciência do século XX; contribuir para a formação cidadã para vida em sociedade, gerar possibilidades de atrair jovens para a carreira científica, futuros pesquisadores, e professores.

Valadares e Moreira (1998), ressaltam que é imprescindível o estudante do Ensino Médio (EM) conhecer os fundamentos da tecnologia atual, já que atua em sua vida e certamente definirá o seu futuro profissional. Daí demonstrar a importância de incluir conceitos básicos da FMC, em especial, de se fazer uma conexão entre a Física da sala de aula e a Física do cotidiano.

Embora seja evidente a importância do ensino de Física Moderna e Contemporânea, e apesar das diversas pesquisas voltadas às temáticas e estratégias citadas anteriormente, ainda se manifestam dificuldades e lentidão na inserção desses tópicos no ensino básico. Tal decorrência indica a presença de obstáculos, como por exemplos: “a falta de um objetivo mais claro do que se quer com esta inserção, falta de material didático adaptável e dificuldades estruturais no processo de formação dos professores.” (JUNIOR e SOUZA, 2009). Com isto, vê-se que as problemáticas podem vir a se estender para o ensino superior e repercutir negativamente nos cursos de formação de professores.

Junior e Souza (2009), destacam que os objetivos da formação em FMC não se apresentam explícitos nas estruturas das Instituições de Ensino Superior, e este fato reflete diretamente na visão e na prática docente de alunos de cursos de licenciatura sobre esta temática.

Terrazzan (1992), resalta que:

A deterioração da qualidade de ensino verificada, desde alguns anos, nas escolas de 2º grau, sobretudo na rede pública, constitui-se numa situação alarmante que deve exigir uma

atenção maior para o problema de formação do profissional que atua no ensino secundário. (TERRAZZAN, 1992)

Com base nas linhas anteriores, é discutido que falta clareza na estrutura de cursos introdutórios em FMC e que isto influencia diretamente na formação de professores. Na pesquisa realizada por Junior e Souza (2009), foi verificado que na maioria dos cursos de licenciatura em Física, os discentes tem contato com FMC através de disciplinas teóricas e práticas. Normalmente, os cursos de Física possuem em sua grade curricular pelo menos uma disciplina introdutória em Laboratório de Física Moderna, que possui uma grande importância na formação docente. Cabe ressaltar que a maioria das trabalhos presentes na literatura apresentam muitas propostas didáticas com o uso de experimentos e práticas de laboratório sobre a motivação de inserir tópicos de FMC no ensino básico. (OSTERMANN e MOREIRA, 2000; PEREIRA e OSTERMANN, 2009; JUNIOR e DE SOUZA CRUZ, 2009; CAVALCANTE e TAVOLARO, 2004; VALADARES e MOREIRA, 1998). Portanto, revelar que é imprescindível que disciplinas experimentais sobre FMC, pelos motivos citados anteriormente, tenham um caráter de estarem sempre atualizadas frente às novas tecnologias e descobertas do século XXI.

2.2 Resistência elétrica

Em 1826, o físico Georg Ohm estabeleceu experimentalmente uma relação entre a corrente elétrica i que passar dois pontos de um metal e a diferença de potencial aplicada V entre esses dois pontos. A resistência R é dada por (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2009; NUSSENZVEIG, 1997; TIPLER; MOSCA, 2006)

$$R = \frac{V}{i} \quad (1.1)$$

A unidade no Sistema Internacional de Unidades (S.I.) para resistência elétrica é dada em **Ohm** (Ω), equivale a 1 volt por ampère.

Na busca de uma melhor compreensão da resistência elétrica quando passagem de corrente em um meio material, é interessante enfatizarmos não a diferença de potencial V entre as extremidades do meio material, mas o campo elétrico \vec{E} que existe num ponto do material resistivo.

A relação é dada pela *lei de Ohm* (eq. 1.2) que estabelece um relação entre a densidade de corrente elétrica \vec{J} e o campo elétrico \vec{E} aplicado.

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (1.2)$$

Onde a constante σ , é denominada como *condutividade elétrica*, que varia para cada material. Em geral, se consideramos um fio de comprimento dl e de secção transversal A , e sobre o qual passa uma corrente elétrica uniforme i (fig.1.1). A diferença de potencial V entre dois pontos a uma distância dl de um material é

$$V = \int \vec{E} \cdot d\vec{l} = E \int dl = EL \quad (1.3)$$

Onde \vec{E} é uniforme e paralelo $d\vec{l}$, e L comprimento total do fio. Por definição, a intensidade da corrente elétrica i que atravessa esse trecho do fio condutor é

$$i = \int \vec{J} \cdot d\vec{A} = J \int dA = JA \quad (1.4)$$

Ou seja, usando a equação 1.2,

$$i = \sigma EA \rightarrow E = \frac{i}{\sigma A} \quad (1.5)$$

Como a diferença de potencial V entre dois pontos à uma distância L de um material é definida como $V = EL$, usando a equação 1.5, obtemos que

$$V = \left(\frac{i}{\sigma A}\right)L \quad (1.6)$$

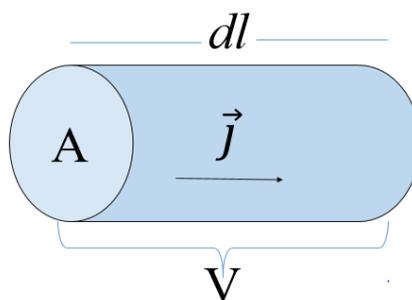


Fig.2.1. Trecho de um fio condutor.

Fonte: o Autor

A partir da equação 1.1 verificasse que o termo entre os parênteses é a resistência elétrica $R = \frac{L}{\sigma A} = \rho \frac{L}{A}$; onde ρ é a resistividade do meio material.

Em consequência da lei de ohm, chega-se a um importante resultado para esta seção, que é a relação entre campo elétrico, \vec{E}_{Ohm} , e a distribuição de densidade de corrente elétrica dentro de um condutor \vec{J}

$$\vec{E}_{Ohm} = \rho \vec{J}, \quad (1.7)$$

ou seja, o campo elétrico \vec{E} é dado pelo produto da resistividade ρ do meio material pela densidade de corrente elétrica \vec{J} dentro de um condutor.

2.3 Efeito Hall normal

O Efeito Hall foi descoberto em 1879 por Edwin H. Hall (OLIVEIRA; 2005), foi observado que quando um condutor conduzindo uma corrente elétrica está sob a ação de um campo magnético externo perpendicular a esta corrente elétrica, uma diferença de potencial, perpendicular a ambos (campo e corrente), é induzida no condutor. Considerando que uma corrente elétrica de densidade ($\vec{J} = J_x \hat{x}$) flui em um meio condutor não magnético e que um campo magnético externo constante e uniforme, $\vec{B} = B_z \hat{z}$, (fig. 1.1) é aplicado ao meio, uma força magnética surge, agindo sobre os portadores de carga do meio, fazendo com que eles sejam deslocados para as extremidades da amostra. Depois de um certo tempo, ocorre uma acumulação dos portadores nas extremidades criando então um campo elétrico ao longo da amostra cuja força elétrica gerada pelo campo elétrico é contrária à força magnética. Na condição de equilíbrio, a força de Lorentz ($\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$) é cancelada devido à interação da força magnética e da força elétrica, isto é, o acúmulo de portadores de cargas com q

> 0 nas extremidades gera um campo elétrico constante ($\vec{E}_H = E_H \hat{y}$) que compensa a ação do campo magnético sobre as mesmas. Na situação citada existirá uma diferença de potencial conhecida com Tensão Hall ou *fem Hall*.

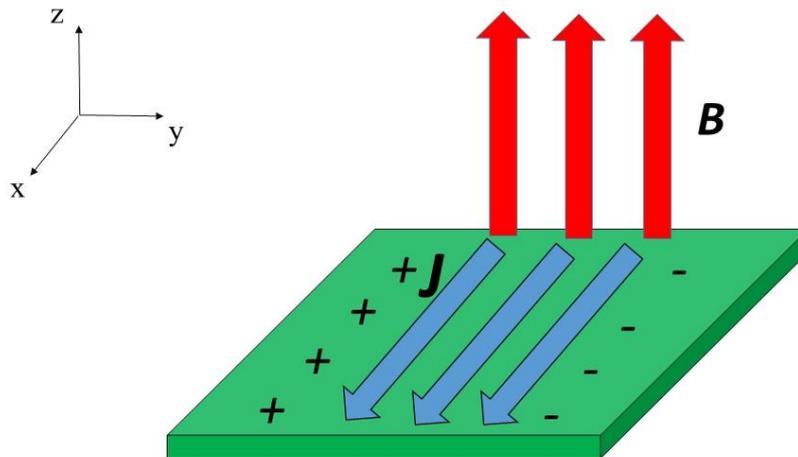


Fig. 2.2: Ilustração do efeito Hall em um filme metálico não magnético, com aplicação do campo magnético.

Fonte: Autor

Temos que, como a força de Lorentz devido a interação é nula;

$$\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) = 0$$

$$\vec{E}_H = v_x B_z \hat{y},$$

Onde $\vec{B} = B_z \hat{z}$, $\vec{v} = v_x \hat{x}$, e $\vec{E} = E_H \hat{y}$. Assim, v_x é velocidade de deriva dos portadores de cargas, $v_x = \frac{j_x}{ne}$, podemos escrever $\vec{j} = ne\vec{v}$. Obtemos,

$$\vec{E}_H = \frac{j_x}{ne} B_z \hat{y}. \quad (1.2)$$

Desta forma, Pela força de Lorentz verificamos que o campo elétrico devido ao efeito Hall é ortogonal ao campo magnético aplicado à densidade de corrente elétrica.

Analisando-se o campo magnético aplicado no filme, nota-se duas situações interessantes : i) se o campo magnético for paralelo a \vec{J} , obtém-se neste caso $\vec{E}_H = 0$ e ii) se o campo magnético for perpendicular a \vec{J} , neste caso obtendo-se $\vec{E}_H = \frac{j_x}{ne} B_z \hat{y}$.

Pode-se ainda reescrever o campo elétrico, devido ao efeito Hall, usando as equações de $\vec{B} = \mu_0 \vec{H}$ (no S.I.)¹ ou $\vec{B} = \vec{H}$ (no CGS)². Vale ressaltar que isso ocorre pelo fato da magnetização total da amostra ser nula. Então, pode-se escrever o efeito Hall como :

$$\vec{E}_H = R_h \vec{J} \times \vec{H}, \quad (1.3)$$

onde $R_h = -1/ne$ (no CGS) é a constante do efeito Hall. O efeito hall é extremamente pequeno e precisa-se de campos magnéticos muito intensos para observá-lo.

2.4 Magnetorresistência Anisotrópica (AMR)

O efeito de Magnetorresistência anisotrópica (AMR) é induzido por corrente elétrica e esse fenômeno ocorre em metais ferromagnéticos, como por exemplo, Ni, Co ou Fe na presença de um campo externo H aplicado (GETZLAFF, 2008).

A origem física do efeito Magnetorresistência AMR é devido ao acoplamento spin órbita. A nuvem de elétrons em torno de cada núcleo deforma-se levemente à medida que a direção da magnetização gira, esta deformação altera a quantidade de espalhamento sofrido pelos elétrons de condução ao atravessar a amostra (NICKEL, 1995). Uma explicação para esse fenômeno é que a direção da magnetização gira a orientação da órbita fechada em relação à

¹ S.I., sigla para *Sistema Internacional de Unidades*.

² CGS é o sistema de unidades físicas que precedeu o Sistema Internacional de Unidades (SI). Muito usado nos EUA.

direção corrente elétrica. Se o campo e a magnetização são orientados transversalmente à corrente fig. 1.2(b), então, as órbitas eletrônicas estão no plano da corrente elétrica e há uma pequena seção transversal para espalhamento, proporcionando um estado de baixa resistência. Por outro lado, para campos externos aplicados paralelamente à corrente, as órbitas eletrônicas são orientadas perpendicularmente à corrente e a seção transversal para o espalhamento é aumentada, o que resulta em um estado de alta resistência fig.1.2.(a).

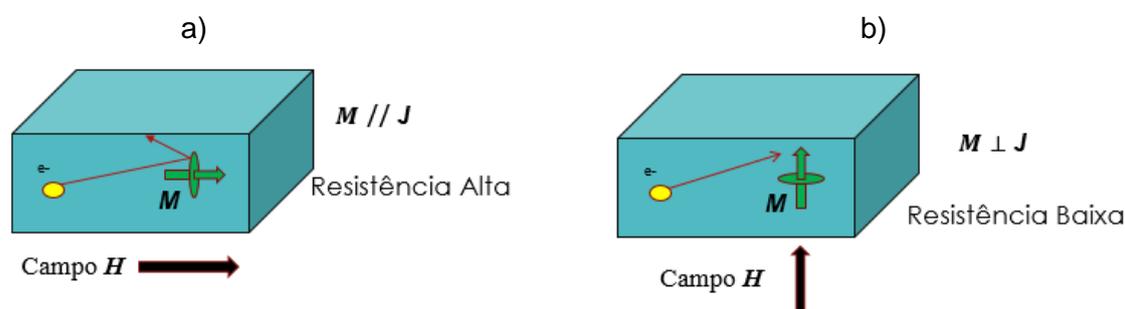


Fig. 2.3: Ilustração da origem física da AMR. a) Representa quando as órbitas (e campo aplicado) são paralelos a corrente elétrica, resultando em uma resistência alta. B) quando as órbitas (e campo aplicado) são transversais à direção de corrente, a seção transversal eletrônica dos elétrons é reduzida, dando um estado de baixa resistência.

Fonte: NICKEL, 1995.

Diversos materiais ferromagnéticos apresentam o efeito de magnetorresistência anisotrópica (AMR), que se manifestam na dependência da resistividade no ângulo entre a direção da corrente elétrica e a magnetização³. A resistência de um filme ferromagnética é máxima quando a corrente é paralela à direção de magnetização e está no mínimo quando a corrente é perpendicular à direção de magnetização. Assim, para interpretar os resultados experimentais é necessário obtermos a mudança do ângulo θ em função do campo H . No

³ O ângulo da Magnetização é geralmente o mesmo que o ângulo do campo aplicado.

gráfico abaixo está algumas medidas de AMR realizadas em filmes com *permalloy* e cobalto (fig. 1.4).

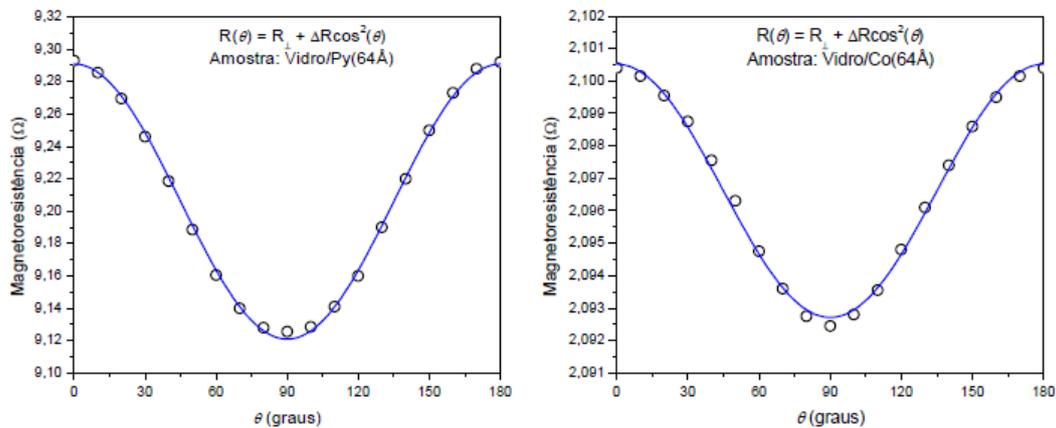


Fig. 2.4: Magnetoresistância Anisotrópica em filmes de *permalloy* e cobalto.

Fonte: Oliveira, 2005.

Este efeito foi descoberto em 1857 por W. Thomson (OLIVEIRA, 2005) e pode-se abordar o fenômeno de magnetoresistância anisotrópica AMR utilizando uma expressão fenomenológica para campo elétrico,

$$\mathbf{E} = \rho_{\perp} \mathbf{j} + (\rho_{\parallel} - \rho_{\perp}) (\mathbf{M} \cdot \mathbf{j}) \frac{\mathbf{M}}{M^2}, \quad (1.5)$$

onde ρ_{\perp} e ρ_{\parallel} são, respectivamente, as resistividades medidas perpendicular e paralelamente à magnetização \mathbf{M} e \mathbf{j} é a densidade de corrente. Na equação (1.5) acima tem-se que o responsável pela magnetoresistância anisotrópica (AMR) é o segundo termo.

Para entender-se melhor os resultados teóricos deste efeito, considere um monodomínio⁴ magnético de magnetização \mathbf{M} formando um ângulo θ com uma densidade de corrente elétrica \mathbf{j} , ambos aplicados no plano de um filme magnético (Fig. 1.2).

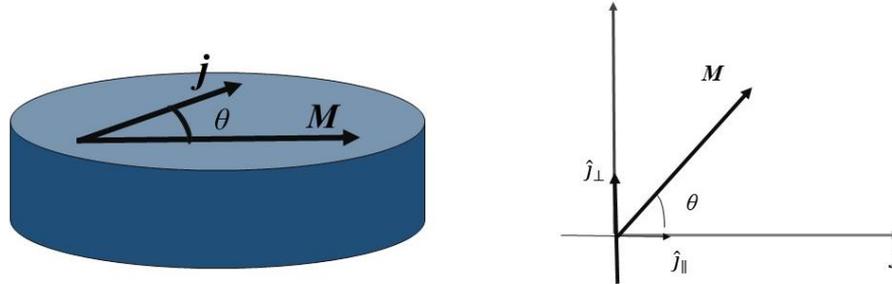


Fig.2.5. Representação entre a densidade J e a magnetização de um monodomínio magnético para a compreensão da AMR.

Fonte: Autor

Podemos decompor a magnetização em relação ao sistema de coordenadas em relação a \mathbf{J} , em duas componentes, uma paralela e outra perpendicular a densidade de corrente. (fig.1.2); Temos que,

$$\frac{\mathbf{M}}{M^2} = \cos \theta \hat{j}_{\parallel} + \sin \theta \hat{j}_{\perp}, \quad \mathbf{J} = J \hat{j}_{\parallel}. \quad (1.6)$$

Substituindo a equação 1.6 na eq. 1.5, obtém-se

$$\mathbf{E} = j(\rho_{\perp} \sin^2 \theta + \rho_{\parallel} \cos^2 \theta) \hat{j}_{\parallel} + \frac{j(\rho_{\parallel} - \rho_{\perp}) \sin(2\theta)}{2} \hat{j}_{\perp} \quad (1.7)$$

Pode-se medir experimentalmente a componente do campo elétrico paralelo a densidade da corrente elétrica usando a técnica de pseudo-quatro pontas, (técnica que foi utilizada neste TCC para realização das medidas), desta forma:

$$|\mathbf{E}| = |\mathbf{E}_{j_{\parallel}}| = j(\rho_{\perp} \sin^2 \theta + \rho_{\parallel} \cos^2 \theta) \quad (1.8)$$

⁴ Isto é, consideramos para fins teóricos que a magnetização da amostra possua módulo constante ($|\mathbf{M}| \equiv \text{constante}$), e que o campo magnético \mathbf{H} apenas modifique a direção de \mathbf{M} sem alterar o seu módulo.

Tem-se por definição a resistividade AMR como o termo que multiplica j na equação 1.8. Obtém-se assim a equação de Voight-Thomson, ou seja,

$$\rho_{AMR} = \rho_{\perp} \sin^2 \theta + \rho_{\parallel} \cos^2 \theta = \rho_{\perp} + \Delta\rho \cos^2 \theta \quad , \quad (1.9)$$

onde $\Delta\rho$ é a diferença entre as resistividades paralela e perpendicular ($\rho_{\parallel} - \rho_{\perp}$) e $\theta = \theta(\mathbf{H})$.

Logo, conclui-se fenomenologicamente, que a magnetorresistência anisotrópica (AMR) pode ser interpretada através do resultado da interação entre a densidade de corrente elétrica aplicada e a magnetização da amostra. O objetivo desse capítulo foi apresentar de forma sucinta o fenômeno de AMR em filmes magnéticos. Será apresentado mais detalhes dos procedimentos e técnicas experimentais nos próximos capítulos.

3 METODOLÓGIA

Os capítulos anteriores constituem um arcabouço teórico que será utilizado para interpretação dos resultados deste TCC. Nesse capítulo será descrito como foi realizado o desenvolvimento da pesquisa deste TCC e tratará de cada etapa efetuada para materialização do trabalho. Nessa perspectiva, nesse capítulo serão apresentadas as técnicas experimentais que foram usadas para o estudo da Magnetorresistência em filmes simples. O desenvolvimento da construção do arranjo experimental, da automação, da montagem experimental e a realização das medidas de magnetorresistência Anisotrópica (AMR) em bicamadas nano-estruturadas metal normal e metal ferromagnético (NM/FM). Toda a construção e automação foi realizada em parceria com o Grupo de Magnetismo e Materiais Magnéticos do DF/UFPE. Os circuitos eletrônicos foram desenvolvidos na Oficina Eletrônica do Departamento de Física da Universidade Federal de Pernambuco. O controle e aquisição dos dados do arranjo experimental foram realizados através de um computador utilizando interfaces GPIB, através do programa LabView. A seguir, serão descritos os principais pontos desenvolvidos para as medidas experimentais: 3.1) o arranjo experimental; e 3.2) a construção da ponte de Wheatstone com amplificador diferencial.

3.1 O Arranjo experimental

A montagem experimental para realização das medidas de magnetorresistência Anisotrópica AMR é representada pelo diagrama na Fig.3.1; é composto basicamente por um eletroímã; um gaussímetro; duas fontes de alimentação AC e DC, uma ponte de Wheatstone com Amplificador diferencial AD620, um lock-in, e um computador PC.

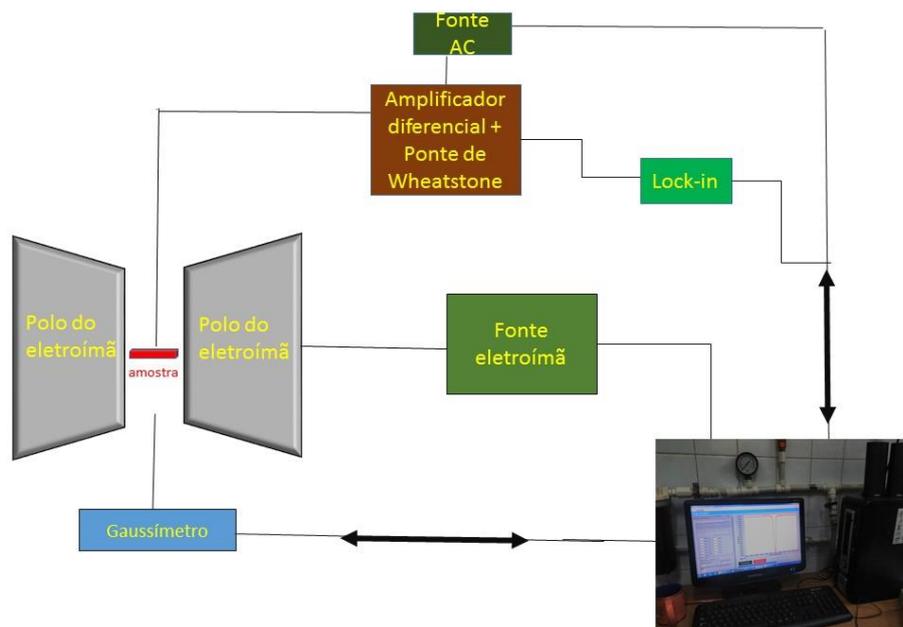


Fig.3.1: Representação do arranjo experimental usado na realização das medidas de AMR.

FONTE: o autor

De forma geral, este arranjo experimental pode ser utilizado para o estudo de propriedades e de diversos fenômenos da interação spin-órbita das bicamadas nano-estruturadas metal normal pesado/ metal ferromagnético (NM/FM), tais como; magnetização, susceptibilidade magnética, magnetorresistência Anisotrópica (AMR), magnetorresistência (GMR), magnetoimpedância gigante (GMI), o efeito spin Hall (Spin Hall Effect-SHE), entre outras. Para isso surgiu a necessidade de construirmos um amplificador diferencial junto com uma ponte de Wheatstone para auxiliar as medidas, principalmente da magnetorresistência anisotrópica.

A ponte de Wheatstone é uma configuração de circuito elétrico utilizada para medições de resistências elétricas. “Foi inventado por Samuel Hunter Christie em 1833, porém foi Charles Wheatstone quem ficou famoso com o invento, tendo-o descrito dez anos mais tarde” (BARROS, NASCIMENTO, MOURA, EGOAVIL, 2018).

O circuito tradicional é composto por uma rede de quatro resistores, sendo três destes conhecidos, uma fonte de tensão e um voltímetro, sendo que três dos resistores possuem resistência conhecida. Para determinar a resistência do resistor desconhecido os outros três devem ser ajustados e balanceados até que resistência caia a zero.

O método usado para medir-se a AMR, gerada pela amostra, consiste em coloca-la em um dos braços da ponte de Wheatstone, tendo em seus outros braços resistores e potenciômetros multivolta⁵ para fazer o ajuste de ganho e o balanceamento da ponte como ilustrado na Fig 3.2.

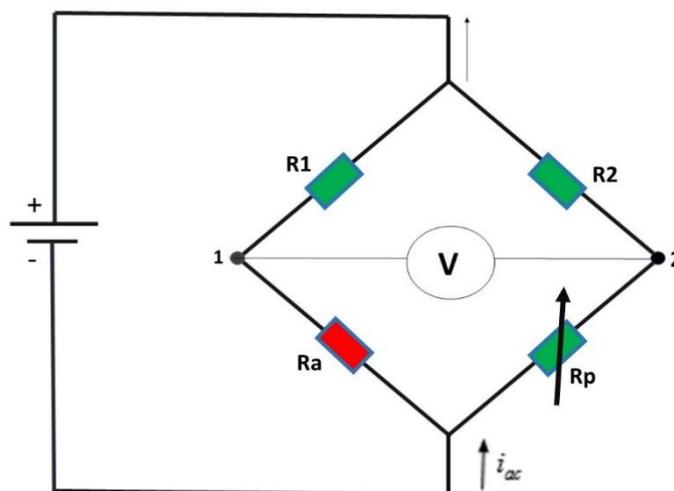


Fig.3.2 – Ponte de Wheatstone usada na técnica experimental de magnetorresistência.

FONTE: o Autor

Este método é necessário, pois a resistência devido a AMR é muito pequena, da ordem de 10^{-3} - 10^{-5} Ohms enquanto que a resistência da amostra é de cerca de dezenas a centenas de Ohms. Com a ponte de Wheatstone, a tensão devido a resistência convencional da amostra pode ser removido através do balanceamento da ponte, sobrando apenas o sinal/tensão devida a AMR. A diferença de potencial nos terminais 1 e 2 é dada pela expressão:

⁵ Potenciômetro Multivolta é um componente eletrônico que possui resistência elétrica ajustável.

$$V_{12} = \left(\frac{R_2 R_a - R_1 R_p}{R_1 + R_a + R_p + R_2} \right) i_{ac}, \quad (1.9)$$

Foram utilizados $R_1 = R_2 = 21,5 \text{ K}\Omega$, sabendo que a resistência da amostra $R_a \approx R_p < 100 \Omega$, onde R_p é a resistência do potenciômetro. Quando ocorre o balanceamento da ponte de Wheatstone, o valor da tensão elétrica mostrada no voltímetro entre os pontos 1 e 2 da ponte é nula. Porém, quando campos magnéticos externos são aplicados na amostra a magnetização muda e se pode observar fenômenos físicos muito interessantes, tais como, a resistência AMR gerada pela magnetização da amostra.

Para se amplificar o sinal medido, conecta-se, aos terminais 1 e 2 da ponte, um amplificador diferencial ⁶AD620, como é mostrado na **Fig 3.3**. Como a resistência da amostra é da ordem de dezenas a centenas de Ohms, para realizar o balanceamento da amostra um potenciômetro 100Ω foi utilizado.

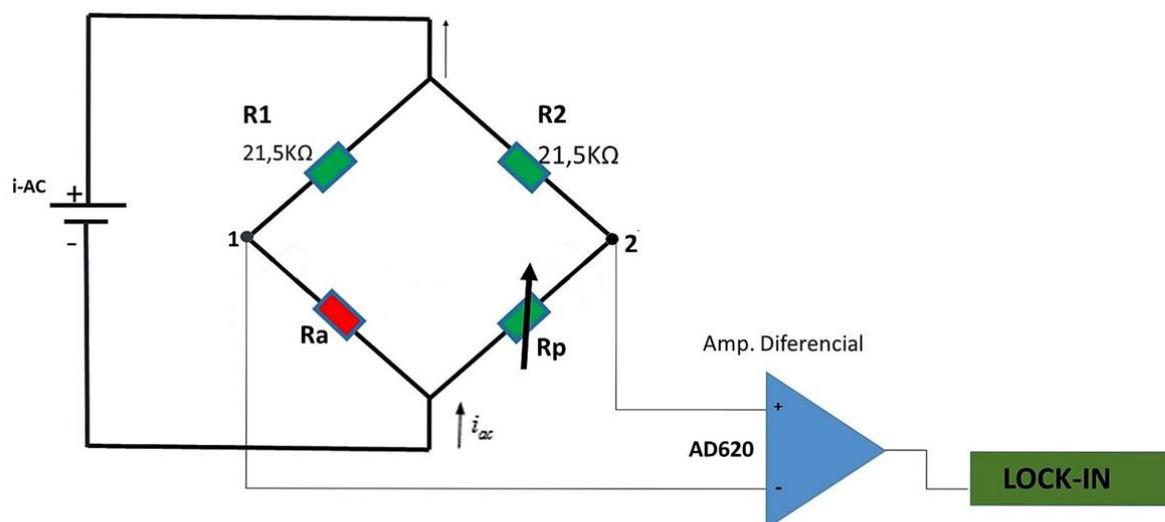


Fig. 3.3- Ponte de Wheatstone (modificada) com amplificador diferencial de baixo ruído, usada nas medidas de magnetorresistência.

⁶ Amplificador diferencial é uma amplificador eletrônico que melhorar o sinal do arranjo experimental.

Quando a resistência varia devido a mudança da magnetização da amostra, o sinal de AMR será amplificado pelo amplificador diferencial e detectado pelo *lock-in*. O *lock-in* é um equipamento que tem como principal atribuição detectar uma tensão/sinal em uma determinada frequência específica e amplificá-la. É importante ressaltar que o *lock-in* pode detectar tanto o sinal do desbalanceamento da ponte, quanto o sinal da variação de resistência da amostra. Por isso, antes de se começar as medidas da magnetorresistência deve-se ter certeza que a ponte de Wheastone está balanceada. Desta forma, ao se aplicar uma corrente AC na amostra, a resistência, gerada pela magnetização da amostra devido a AMR, é detectada. Uma vez que o campo magnético externo aplicado a amostra é suficientemente forte para saturar a magnetização na sua direção, a AMR dependerá da direção entre o campo aplicado e a corrente elétrica aplicada.

Quando realiza-se medidas utilizando o *lock-in*, é importante notar que a medida que vem do *lock-in* é tensão, por isso, o resultado experimental da magnetorresistência ficará *Tensão* em função do *Campo Magnético*. Deveremos então fazer a conversão da diferença de potencial ddp em resistência elétrica. Para isso, é realizado a calibração da magnetorresistência através da relação linear da tensão medida no *lock-in* e a resistência da amostra, medidas a partir do arranjo experimental (**Fig.3.4**). Para realizar esta calibração substitui-se a amostra por resistores com resistência conhecida e relaciona-se a tensão medida pelo *lock-in* com o valor das resistências utilizadas. Com isto encontra-se uma relação linear entre a tensão medida e a resistência da amostra ou resistência de AMR.

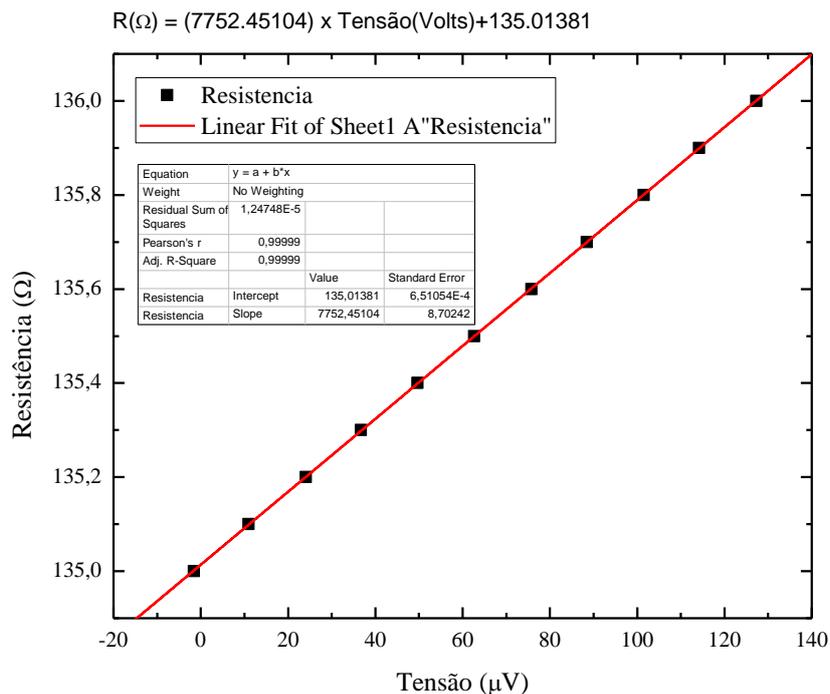


Fig. 3.4: calibra\~ao da magnetorresist\~encia. Ou seja, resist\~encia da amostra em fun\~cao da tens\~ao medida no lock-in.

3.2. Constru\~ao da ponte de Wheatstone com amplificador diferencial

A constru\~ao da ponte de Wheatstone com um amplificador de diferencial (m\~etodo experimental tamb\~em conhecido como pseudo quatro pontas) foi realizada no oficina eletr\~onica do Departamento de F\~isica da UFPE, e \~e bastante simples de ser montada. Abaixo, seguem-se os passos e etapas da constru\~ao realizadas na produ\~ao do arranjo experimental;

1. Foi desenhado e projetado a placa do circuito; em seguida, foi feito o dimensionamento, corte e linchamento da placa de fenolite-plana;

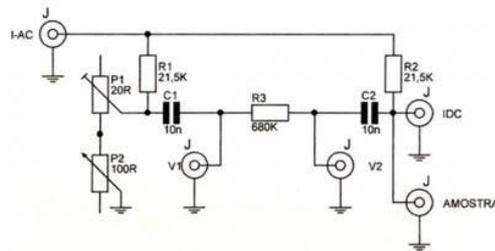


Fig. 3.5. Desenho do circuito elétrico da ponte de wheatstone

Fonte : Departamento de Física – UFPE

2. Houve a impressão do desenho do circuito em papel fotográfico, e foi fixado junto a placa já cortada, e em seguida, foi colocado no forno sobre uma malha de silicone;
3. Após retirada do forno, foi realizado alguns reparos de falhas no circuito impresso; feito isto é necessária a lavagem da placa com hipercroreto; Após, o término da corrosão, retirou-se o tone com tina (pode ser com acetona) e foi aplicado verniz;
4. Foram feitos furos na placa para a colocação e soldagem dos componentes eletrônicos (resistores, capacitores, potenciômetros multivolta , conectores e amplificador diferencial AD620).

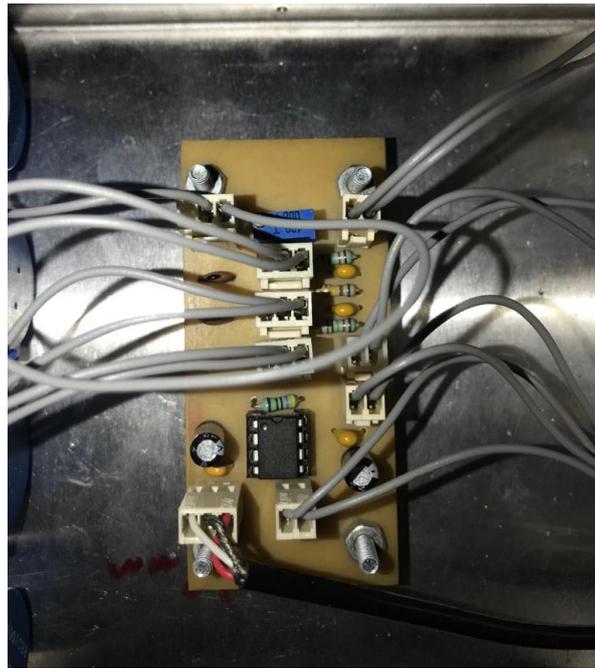


Fig. 3.6 : Placa de fenolite-plana com os componentes eletrônicos montados.

Fonte: Autor

5. Passo: Foi desenhado o painel frontal e o painel traseiro, em seguida, foram feitos os orifícios na caixa de alumínio, feito isto, foi inserido a placa pronta, assim como foram realizadas as soldas nos painéis dos conectores bnc, potenciômetros, as chaves, e as entradas para alimentação, de corrente AC, corrente DC e da amostra.



Fig. 3.7: Painel frontal com os potenciômetros e as chaves, e painel traseiro com as entradas para alimentação, de corrente AC, corrente DC e da amostra.

Fonte: Autor

4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Após toda a discussão teórica e metodológica presentes nos capítulos anteriores e que embasam as ações deste trabalho é chegado o momento de observar, analisar e posteriormente dar um tratamento adequado e organizado para os resultados obtidos com a vivência das atividades propostas.

Para verificação do funcionamento do arranjo experimental, foram realizados medidas convencionais. Neste caso, utilizou-se uma amostra que contém *Permalloy*(Py/Cu), onde a magnetorresistência é devido a AMR. A escolha pelo *Permalloy* (HOELSCHER; FRANZ; GÜNDEL, 2010 e DA SILVA; DE ANDRADE; GÜNDEL, 2010) não foi ao acaso: este material é uma liga de 80% de Ni (Níquel) e 20% de Fe (Ferro). E apresenta características importantes, tais como, alta permeabilidade magnética, altos valores de magnetização de saturação, baixa coercividade e magnetorresistência anisotrópica significativa; sendo assim é bastante utilizado em aplicações tecnológicas. Filmes finos de *Permalloy* são geralmente produzidos devido a técnica de deposição *sputtering*. O filme de $Ni_{80}Fe_{20}$ (*Permalloy*) foi crescido induzindo-se nele uma forte anisotropia magnética.

Para obtermos os gráficos da magnetorresistência AMR do *Permalloy*, é aplicado um campo magnético externo H no plano da amostra de tal a forma a saturar o filme. Feito isto, a medida é obtida girando a amostra de forma gradativa em relação ao campo H . Desta forma, temos uma variação do ângulo θ entre a magnetização e a densidade de corrente. Vale destacar que a magnetização está sempre alinhada ao campo magnético H , devido a saturação do filme. Como visto anteriormente na seção 2.4, a resistência elétrica devido a magnetização é proporcional ao ângulo entre a densidade de corrente J e a magnetização da amostra M , ou seja, $R \propto \cos^2 \theta$. Mas, como foi dito nas linhas anteriores a magnetorresistência presente na amostra de estudo é devida AMR, ou seja, $AMR \propto \cos^2 \theta$.

Verificou-se que a montagem experimental para o estudo dos efeitos de magnetorresistência em metal ferromagnético devido a magnetização funcionou bem para a realização das medidas de magnetorresistência anisotrópica, particularmente, para o *Permalloy* como pode-se ver na fig.4.1.

A Fig. 4.1 mostra a dependência percentual da resistência com o campo magnético aplicado. É possível ver uma mudança brusca na resistência quando o campo magnético reverte o seu sentido, particularmente entorno da região $-100 \text{ Oe} < H < 100 \text{ Oe}$. Nesta medida a magnetização está saturada apenas quando o valor absoluto do campo magnético é superior a 100 Oe . Assim para valores, em módulo, inferiores a 100 Oe a magnetização pode não estar alinhada com o campo magnético estando em outra direção. Variando-se o valor do campo magnético de forma que a magnetização saia de um estado de saturação, por exemplo, paralelo a x para uma estado de saturação paralelo a $-x$, a magnetização, no modelo de monodomínio, girará da direção x para a $-x$. Desta forma, se a corrente aplicada permanecer estática na mesma direção, o ângulo entre a magnetização e a corrente variará. Enquanto a magnetização estiver apontando na direção paralela ou antiparalela a corrente, a resistência não mudará. Contudo, quando a magnetização não estiver mais alinhada com a corrente, a resistência variará, chegando a zero quando a magnetização for perpendicular a corrente, como mostrado na Fig. 4.1.

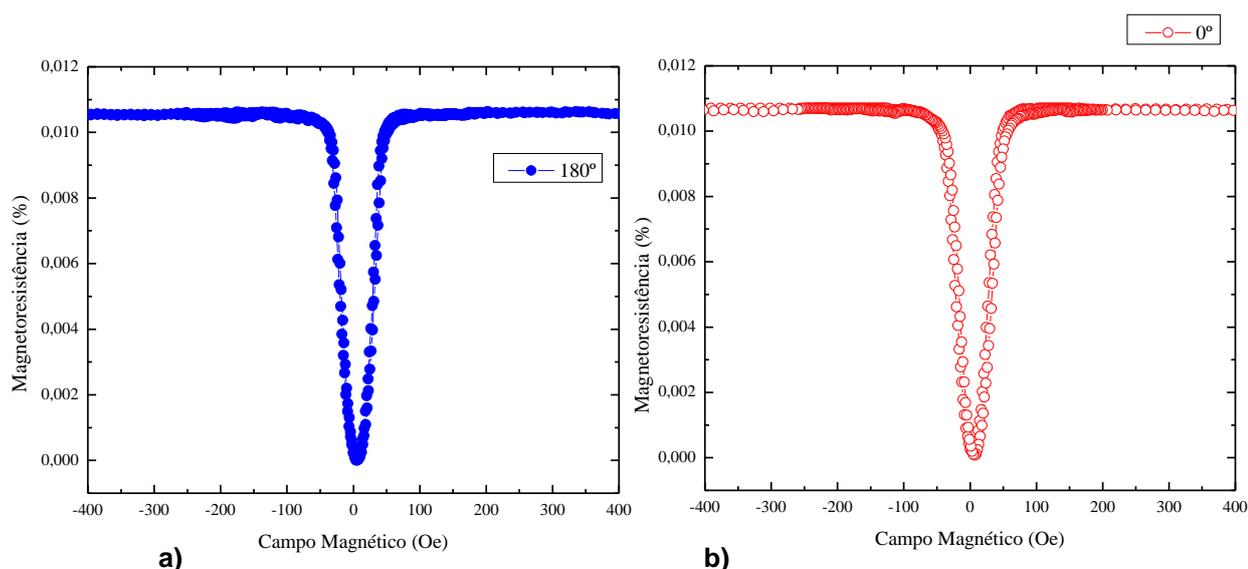


Fig. 4.1: Resultados experimentais de magnetorresistência para uma bicamada de Py/Cu50° ; a) com $\theta = 180^\circ$; b) com $\theta = 0^\circ$.

A Fig. 4.2 mostra a variação da resistência com o ângulo entre a magnetização, ou campo magnético, e a corrente elétrica. Neste caso as medidas foram realizadas com a magnetização saturada na direção do campo, mostrando que dependência da AMR com o ângulo entre a corrente e a magnetização é proporcional a $\cos^2 \theta$. (observação: no resultado experimental abaixo, a corrente nas medidas estava com sentido contrário ao convencional, por isto, ocorre uma inversão em comparação ao gráfico da secção 2.4.)

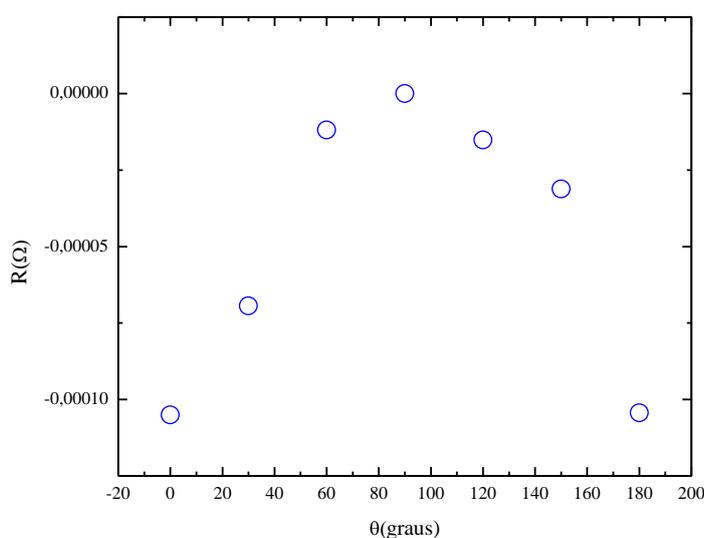


Fig. 4.2. Resultado experimental da magnetorresistência anisotrópica

Cabe salientar que o que foi realizado pode ser feito em um filme fino ou em um fio magnético. Como, por exemplo, um fio de níquel. Basta que o material seja magnético, condutor e que tenha alguma anisotropia magnética.

Existe ainda uma expectativa de possíveis estudos de outros efeitos e fenômenos relacionados a materiais magnéticos, tendo possibilidades de melhorias no sistema e melhor domínio técnico sobre as técnicas experimentais já conhecidas e em outras, para o estudo de fenômenos relacionados às interações citadas anteriormente, por exemplo, magnetização, susceptibilidade magnética, magnetorresistência Anisotrópica (AMR), magnetorresistência (GMR), magneto-impedância gigante (GMI), o efeito spin Hall (Spin Hall Effect-SHE), e entre outras.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Diante de tudo que já foi apresentado neste trabalho, é evidenciado possibilidades para melhoria do ensino em disciplinas de Laboratório de Física de Moderno. Mostrando que é possível trabalhar com arranjos experimentais que explorem fenômenos físicos contemporâneos com equipamentos de baixo custo.

Na culminância do presente trabalho foi verificado que o arranjo experimental proposto funciona perfeitamente para o estudo dos efeitos citados anteriormente, especificamente, nas medidas de Magnetorresistência Anisotrópicas em bicamadas metal normal/ metal ferromagnético. Como por exemplo, as medidas realizadas em amostras de *Permalloy* (fig. 4.1). Existe uma viabilidade em relação tanto a aquisição de novos conhecimentos através de práticas experimentais e teóricas sobre fenômenos devidos a interação spin-órbita, quanto na aplicação do arranjo em disciplinas de laboratório em física experimental.

Muitos trabalhos veem sendo desenvolvidos e publicados em relação a Spintrônica, isto é, nos últimos anos diversos fenômenos estão sendo evidenciados. Nesta perspectiva, é interessante fazer uma reflexão sobre as possibilidades na abordagem dessa temática em cursos de graduação que tenham punho científico/tecnológico, e na possível oferta de usar alguma proposta didática experimental que tragam tais análises fenomenológicas para dentro de sala de aula.

Por fim, espera-se que o trabalho realizado possa ser utilizado futuramente para auxiliar professores e alunos como uma possível proposta para o estudo de efeitos voltados a área de magnetismo e etc.

REFERÊNCIAS

BARROS, E. C.; NASCIMENTO, L. A. F.; MOURA, A. F. L.; EGOAVIL, C. J. **PONTE DE WHEATSTONE**. Roteiro Laboratorial Nº 1. Fundação Universidade Federal de Rondônia –UNIR, 2018.

CAVALCANTE, Marisa Almeida; TAVOLARO, Cristiane Rodrigues Caetano. Uma oficina de física moderna que vise a sua inserção no ensino médio. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 21, p. 372-389, 2004.

COSTA, Luciano Gonsalves; BARROS, Marcelo Alves. **O ensino de física no Brasil: problemas e desafios**. In: CONGRESSO NACIONAL DE EDUCAÇÃO. 2015.

DA SILVA, Mateus Guimarães; DE ANDRADE, Antonio Marcos Helgueira; GÜNDEL, André. **Propriedades magnéticas e estruturais de filmes finos de Permalloy**. Anais do Salão Internacional de Ensino, Pesquisa e Extensão, v. 2, n. 1, 2010.

GETZLAFF, Mathias. **Fundamentals of Magnetism**, Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 2008.

HALL, Edwin H. **On a new action of the magnet on electric currents**. American Journal of Mathematics, v. 2, n. 3, p. 287-292, 1879.

HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. **Fundamentos de física**. 8. ed. Rio de Janeiro, RJ: LTC, c2009 vol 3.

HOELSCHER, Fernanda; FRANZ, Tuanny Santos; GÜNDEL, André. Filmes finos de Permalloy obtidos por eletrodeposição. **Anais do Salão Internacional de Ensino, Pesquisa e Extensão**, v. 2, n. 1, 2010.

HOELSCHER, Fernanda; FRANZ, Tuanny Santos; GÜNDEL, André. **Filmes finos de Permalloy obtidos por eletrodeposição**. Anais do Salão Internacional de Ensino, Pesquisa e Extensão, v.2, n. 1, 2010.

JUNIOR, Mikael Frank Rezende; DE SOUZA CRUZ, Frederico Firmo. **Física moderna e contemporânea na formação de licenciandos em física: necessidades, conflitos e perspectivas**. Ciência & Educação, v. 15, n. 2, p. 305-321, 2009.

KITTEL, C. **Introdução à física do estado sólido**. 8 ed. LTC. 2006.

MOREIRA, Marco Antonio. **Ensino de Física no Brasil: retrospectiva e perspectivas**. Revista brasileira de ensino de física. São Paulo. Vol. 22, n. 1 (mar. 2000), p. 94-99, 2000.

MOREIRA, Marco Antônio. **Grandes desafios para o ensino da física na educação contemporânea**. Porto Alegre, RS, 2014.

MOREIRA, Marco Antonio. Mapas conceituais e aprendizagem significativa¹ (concept maps and meaningful learning). **Aprendizagem significativa, organizadores prévios, mapas conceituais, diagramas ve unidades de ensino potencialmente significativas¹**, p. 41, 1982.

NICKEL, Janice. **Magneto-resistance overview**. Hewlett-Packard Laboratories, Technical Publications Department, 1995.

NUSSENZVEIG, H. Moysés Curso de Física Básica 3: Eletromagnetismo, Editora Edgard Blücher, 1997.

OLIVEIRA, Alexandre Barbosa de. **Magneto-resistência em filmes e multicamadas magnéticas**. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Pernambuco. 2005.

OSTERMANN, Fernanda; MOREIRA, Marco Antonio. **Uma revisão bibliográfica sobre a área de pesquisa “Física Moderna e Contemporânea no Ensino Médio”**. Investigações em ensino de ciências, v. 5, n. 1, p. 23-48, 2000.

PEREIRA, Alexsandro Pereira de; OSTERMANN, Fernanda. **Sobre o ensino de física moderna e contemporânea: uma revisão da produção acadêmica recente**. Investigações em ensino de ciências. Porto Alegre. Vol. 14, n. 3 (dez. 2009), p. 393-420, 2009.

RIJKS*, Th. G. S. M. ; LENCZOWSKI, S. K. J. **In-plane and out-of-plane anisotropic magneto-resistance in Ni₈₀Fe₂₀ thin films**. Physical Review B. V. 56, 1997.

SOUZA FILHO, M. P.; GRANDINI, Carlos Roberto. Uma análise estrutural do conteúdo experimental de eletromagnetismo nos livros didáticos de física adotados para o Ensino Médio. **ENCONTRO NACIONAL DE PESQUISA EM EDUCAÇÃO EM CIÊNCIAS, IV**, 2003.

TERRAZZAN, Eduardo Adolfo. **A inserção da física moderna e contemporânea no ensino de física na escola de 2º grau.** Caderno Brasileiro de Ensino de Física, v. 9, n. 3, p. 209-214, 1992.

THOMSON, W. **On the Electro-Dynamic Qualities of Metals:--Effects of Magnetization on the Electric Conductivity of Nickel and of Iron .** Proceedings of the Royal Society of London. Vol. 8, p. 546-550 (1857);
TIPLER, Paul A.; MOSCA, Gene, Física para Cientistas e Engenheiros - Vol. 2, 5a ed. Rio de Janeiro: LTC, 2006.

VALADARES, E. C., MOREIRA, A. M. **Ensinando física moderna no segundo grau: efeito fotoelétrico, laser e emissão de corpo negro.** Caderno Catarinense de Ensino de Física, Florianópolis, v. 15, n. 2, p. 121-135, ago. 1998.

VILELA, Gilvânia Lúcia da Silva. **GERAÇÃO E DETECÇÃO DE CORRENTES PURAS DE SPIN PELOS EFEITOS DE SPIN PUMPING E SEEBECK DE SPIN.** Tese de Doutorado. Universidade Federal de Pernambuco- UFPE. 2013.

VILELA-LEÃO, L. H., **Dinâmica de spins em interfaces metálicas: Mecanismos de Relaxação e bombeamento de Spin.** Tese de doutorado, Universidade Federal de Pernambuco. 2010.