



**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
DO CEARÁ
IFCE CAMPUS FORTALEZA
PROGRAMA PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE
TELECOMUNICAÇÕES**

LUANA SAMARA PAULINO MAIA

**SENSOR DE CORRENTE ELÉTRICA E CAMPO MAGNÉTICO
ALTERNADOS UTILIZANDO MODULAÇÃO DA LUZ PELA
INTERFERÊNCIA MULTIMODAL EM FIBRAS ÓPTICAS**

**FORTALEZA
2020**

LUANA SAMARA PAULINO MAIA

SENSOR DE CORRENTE ELÉTRICA E CAMPO
MAGNÉTICO ALTERNADOS UTILIZANDO
MODULAÇÃO DA LUZ PELA INTERFERÊNCIA
MULTIMODAL EM FIBRAS ÓPTICAS

Dissertação apresentada à Coordenação de Pós-Graduação em Engenharia de Telecomunicações do Instituto Federal do Ceará (IFCE) - Campus Fortaleza, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Telecomunicações. Área de concentração: Micro-Ondas e Óptica Integrada.

Orientador: Prof. Dr. Glendo de Freitas Guimarães.

Co-orientador: Prof. Dr. Marcus Aurélio Ribeiro Miranda

Fortaleza
2020

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Instituto Federal do Ceará - IFCE
Sistema de Bibliotecas - SIBI
Ficha catalográfica elaborada pelo SIBI/IFCE, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- M217s Maia, Luana Samara Paulino.
 Sensor de Corrente Elétrica e Campo Magnético Alternados Utilizando Modulação da Luz pela Interferência Multimodal em Fibras Ópticas / Luana Samara Paulino Maia. - 2020.
 93 f. : il.
- Dissertação (Mestrado) - Instituto Federal do Ceará, Mestrado em Engenharia de Telecomunicações, Campus Fortaleza, 2020.
 Orientação: Prof. Dr. Glendo de Freitas Guimarães.
 Coorientação: Prof. Dr. Marcus Aurélio Ribeiro Miranda.
1. Sensor. . 2. Interferência modal. . 3. Corrente elétrica. . 4. Campo magnético. 5. Fibra óptica.. I.
 Titulo.

CDD 621.382



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO CEARÁ

ATA DA 68ª DEFESA DE DISSERTAÇÃO

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE TELECOMUNICAÇÕES

Ata de defesa do Programa de Pós-graduação em Engenharia de Telecomunicações, do Curso de Mestrado Acadêmico em Engenharia de Telecomunicações (PPGET), ofertado pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará - IFCE, apresentado e defendido pelo mestrando **LUANA SAMARA PAULINO MAIA**.

No dia 17 de dezembro de 2020, às 15 horas, no link: <https://meet.google.com/akm-yxcc-fru?hs=122&authuser=1>, foi realizada a defesa de dissertação da mestranda **LUANA SAMARA PAULINO MAIA** sob o título: "SENSOR DE CORRENTE ELÉTRICA E CAMPO MAGNÉTICO ALTERNADOS UTILIZANDO MODULAÇÃO DA LUZ PELA INTERFERÊNCIA MULTIMODAL EM FIBRAS ÓPTICAS". Obedecendo ao disposto no Regulamento do PPGET, a Banca Examinadora foi constituída pelos seguintes professores: Prof. Dr. Glendo de Freitas Guimarães (Orientador – IFCE); Prof. Dr. Marcus Aurélio Ribeiro Miranda (coorientador - IFCE), Prof. Dr. Eweton Wagner Santos Caetano (IFCE) e Prof. Dr. Renato Juliano Martins (CRHEA).

O professor orientador apresentou o mestrando e os membros da Banca Examinadora bem como explicitou a dinâmica da defesa. Em continuidade, o presidente cedeu a palavra ao mestrando para expor seu trabalho de pesquisa. Uma vez concluída a exposição pelo mestrando, a Banca Examinadora procedeu às avaliações, sendo assegurado ao mestrando o direito de resposta ou de esclarecimento. Continuando o processo, a Banca Examinadora reuniu-se privativamente para emitir o parecer e, sequencialmente, informou ao mestrando que a sua dissertação foi considerada:

(X) aprovado(a)

() reprovado(a)

A Banca Examinadora indicou, ainda, os seguintes ajustes e procedimentos necessários para a consolidação da pesquisa. Seguir as recomendações dos membros da banca.

Nada mais havendo a tratar, o presidente da Banca Examinadora lavrou esta Ata de Exame de defesa que, após assinada pelos seus membros, será encaminhada à Coordenação do PPGET/IFCE para registro acadêmico na documentação do mestrando.

Orientador Prof. Dr. Glendo de Freitas Guimarães

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará - IFCE

Prof. Dr. Marcus Aurélio Ribeiro Miranda

Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira - Unilab

Prof. Dr. Eweton Wagner Santos Caetano

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará - IFCE

Prof. Dr. Renato Juliano Martins

Centre de Recherches sur l'HétéroEpitaxie et ses Applications (CRHEA/França)

Mestranda **LUANA SAMARA PAULINO MAIA**

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará - IFCE



Documento assinado eletronicamente por **Francisco Jose Alves de Aquino, Coordenador(a) do PPGET**, em 23/12/2020, às 21:36, com fundamento no art. 6º, § 1º, do Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015.



Documento assinado eletronicamente por **Glendo de Freitas Guimaraes, Professor do Ensino Básico, Técnico e Tecnológico**, em 06/01/2021, às 15:14, com fundamento no art. 6º, § 1º, do Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015.



Documento assinado eletronicamente por **Ewerton Wagner Santos Caetano, Professor do Ensino Básico, Técnico e Tecnológico**, em 13/01/2021, às 14:51, com fundamento no art. 6º, § 1º, do Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015.



A autenticidade do documento pode ser conferida no site https://sei.ifce.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0 informando o código verificador **2250835** e o código CRC **9187C5CD**.

Dedico este trabalho à minha querida e amada mãe.

Agradecimentos

Gostaria de expressar os meus sinceros agradecimentos a todos aqueles que de alguma forma possibilitaram a realização deste trabalho, em especial:

A Deus, por guiar meus passos iluminando o caminho e me dar forças e sustentação durante essa caminhada.

A minha querida e amada mãe, Liduína Paulino, por ser essa pessoa tão maravilhosa, a qual sempre me apoiou, mesmo sem entender bem o que faço, ela apenas acredita em mim.

A uma pessoa muito importante na minha vida, tanto pessoal como acadêmica, Roberto Silva. Te agradeço imensamente por toda paciência com essa cabeça dura que sou eu... por sempre extrair de mim o melhor mesmo quando meu céu parece tempestuoso. Por estar sempre presente apoiando de forma incondicional.

A Luiza Helena, por todo apoio e carinho... pela atenção... por ser essa pessoa tão cheia de luz...e por tornar tão melhores os meus dias.

Ao meu orientador Glendo de Freitas, por ter acreditado em mim desde a graduação... pela confiança... por ser uma referência tanto profissional como humana... por todo apoio direcionado... Pelas críticas construtivas que melhoraram a estrutura desse trabalho, pelas sugestões e questionamentos levantados... enfim, por orientar com tanta sabedoria e por ser esse exemplo de ser humano.

Ao meu co-orientador, Marcus Miranda, pela paciência em tirar dúvidas que foram surgindo, pelas diversas vezes em que me vi em um beco sem saída, e ele aparecia com uma nova ideia, sempre pensando fora da caixa. Por sempre se mostrar solícito. A você Marcus, minha eterna gratidão.

A duas pessoas incríveis que tive a honra de poder trabalhar... Ieda Maria e Beatriz Cristina, esse trabalho também é fruto de vocês... Saibam que tenho um carinho imenso pelas duas... sou muito grata por ter feito parte de uma equipe de mulheres tão competentes e proativas. Obrigada por terem tido tanto carinho pelo projeto.

A banca da qualificação composta pelos professores Francisco José (coordenador do PPGET), Francisco Rafael e Danilo Sousa pelas considerações valiosas que melhoram a estrutura e escrita deste trabalho.

A banca de mestrado composta pelos professores, Marcus Miranda (UNILAB), Ewerton Wagner (IFCE) e Renato Juliano Martins (CRHEA - França), por todas as valiosas sugestões que engrandeceram este trabalho.

A Raiane Rocha Reis e Pedro Henrique, que deixaram suas importantes contribuições

técnicas e estratégicas no início do desenvolvimento do projeto.

Ao professor Dr. Auzuir Ripardo pela orientação na escrita deste trabalho e pelas palavras de apoio.

Ao professor Isaac Miranda, que por diversas vezes em que precisei, nunca hesitou em me prestar auxílio. Mesmo quando eu chegava com alguma dúvida e ele não sabia responder, pacientemente sentava comigo e buscava entender. A você, Isaac... meu muito obrigada!

Aos amigos Alan e Pedro do fotônica, por sempre me prestarem auxílio com a impressão de peças na 3d e pelos desenhos incríveis feitos no solid Edge.

Aos meus amigos Waleska Feitosa e Diego Boto pela amizade, companheirismo e pelas conversas de desabafos que nos permitiam dar boas risadas de desespero (risos).

Ao mestre e poeta de Poá, Humberto Gessinger, pelo sensacional show de maio de 2019 em Fortaleza, que me permitiu descarregar todas as energias negativas daquele momento. Pelas canções maravilhosas que alegram meus dias e que eu escutava enquanto digitava a dissertação.

Aos colegas do laboratório de fotônica e amigos pela contribuição com aprendizado, descontração e parceria nas atividades.

A todos que de alguma forma contribuíram com os frutos desse trabalho, mas que por falha da memória, não pude lembrar.

-Há uma força motriz mais poderosa que o vapor, a eletricidade e a energia atômica: a vontade.

(Albert Einstein)

-Nos livros de história seremos a memória dos dias que virão.

(Trecho da música: Exército de um homem só - Humberto Gessinger)

Resumo

Os medidores de corrente elétrica comerciais, apesar de já serem bem estabelecidos, possuem algumas características que os tornam obsoletos e não confiáveis, pois apresentam montagens complexas, como é o caso dos sensores de fibra óptica, também possuem um custo de produção elevado, além possuírem uma certa robustez estrutural. Além disso, alguns medem apenas uma pequena faixa de campo magnético e corrente elétrica. A importância de aferir e monitorar os parâmetros eletromagnéticos está diretamente relacionada com alguns fatores, como por exemplo, na medição precisa do consumo e na identificação rápida de falhas em sistemas de energia, implicando que o fornecimento de energia não seja interrompido. Neste trabalho, um novo sensor de campo magnético utilizando fibra óptica em uma estrutura SM - MM (*Single-Mode - Multi-Mode*) foi proposto e demonstrado experimentalmente. O método aplicado baseia-se nos efeitos de interferência multimodal, cuja fibra MM (Multimodo) foi revestida com aço carbono. Um laser de onda contínua com comprimento de onda de 1550 nm foi usado para alimentar a estrutura. O sinal na saída da fibra MM é captado por um fotodiodo, possibilitando a aferição do sinal em termos da tensão utilizando-se um multímetro digital. Variações em um campo magnético externo gerado por uma bobina podem causar alterações na transmissão óptica do sensor ao interagir com o aço carbono. Observou-se um crescimento na intensidade do sinal medido na saída do sensor, com variações crescentes do campo magnético. Duas sensibilidades foram encontradas ao posicionar a bobina em 2 cm e 4 cm em relação a fibra MM, cujos valores são 78,13 mV/mT e 79,80 mV/mT. A variação na transmissão óptica em relação a intensidade do campo magnético alcançou uma linearidade de 98,29%. O crescimento da potência com o campo possui um comportamento logarítmico, portanto, a sensibilidade foi calculada apenas para uma escala linear que abrange uma faixa de campo de 4,49 a 12,57 mT. No entanto, a faixa de campo total medida foi de 1,46 à 13,89 mT, com distância fixa em 4 cm. Destaca-se que o método utilizado neste experimento é menos complexo do que a maioria dos que são descritos na literatura, além de apresentar excelentes características de custo, compactidade e estrutura simples, com aplicações potenciais na medição de campo magnético alternado.

Palavras-chaves: Sensor. Interferência modal. Fibra óptica. Corrente elétrica. Campo magnético.

Abstract

Commercial electric current meters, although already well produced, have some characteristics that make them obsolete and unqualified, as they have complex assemblies, as is the case with optical fiber sensors, also have a high production cost, in addition to having a structural strength. In addition, some measure only a small range of magnetic field and electrical current. The importance of measuring and monitoring electromagnetic parameters is directly related to some factors, such as, for example, the accurate measurement of consumption and the rapid identification of faults in power systems, implying that the power supply is not interrupted. In this work, a new magnetic field sensor using optical fiber in an SM - MM structure (textit Single-Mode - Multi-Mode) was proposed and characterized by experimentally. The method is based on the effects of multimodal interference, whose MM fiber (Mutimodo) was coated with carbon steel. A continuous wave laser with a wavelength of 1550 nm was used to power a structure. The signal at the MM fiber output is captured by a photodiode, enabling a measurement of the signal in terms of voltage using a digital multimeter. Variations in an external magnetic field generated by a coil can cause changes in the optical transmission of the sensor when interacting with carbon steel. There was an increase in the intensity of the signal measured at the sensor output, with increasing variations in the magnetic field. Two sensitivities were found when placing the coil at 2 cm and 4 cm in relation to the MM fiber, considered values are 78.13 mV / mT and 79.80 mV / mT. The variation in optical transmission in relation to the intensity of the magnetic field reached a linearity of 98.29 %. The growth of power with the field has a logarithmic behavior, therefore, the sensitivity was obtained only for a linear scale that covers a field range from 4.49 to 12.57 mT. However, a total measured field range was 1.46 to 13.89 mT, with a fixed distance of 4 cm. It is noteworthy that the method used in this experiment is less complex than most of the previous ones in the literature, in addition to presenting excellent characteristics of cost, compactness and simple structure, with resources in reality of alternating magnetic field.

Key-words: Sensor. Modal interference. Optical fiber. Electric current. Magnetic field.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Fibra de índice degrau	28
Figura 2 – Fibra de índice gradual	28
Figura 3 – Pulsos de luz à medida que são transmitidos ao longo de uma fibra: (a) entrada de fibra; (b) alargamento temporal do pulsos (c) Alargamento temporal e interferência entre pulsos.	29
Figura 4 – Modos de propagação em fibra multimodo de índice degrau	31
Figura 5 – Fenômeno da interferência multimodo	33
Figura 6 – Arranjo de uma configuração SMF - MMF	35
Figura 7 – Caminhos que a luz percorre no interior da estrutura SMF-MMF	35
Figura 8 – Critérios de seleção dos artigos	39
Figura 9 – Diagrama esquemático do sensor de campo magnético proposto	41
Figura 10 – Esquema do MFC proposto	42
Figura 11 – Esquema do MZI baseado em fibra óptica oca	43
Figura 12 – (a) Diagrama esquemático da configuração experimental para o teste de tenabilidade do campo magnético. (b) A microestrutura preenchida com MF é selada em um capilar com cola. (c) Diagrama de estrutura do SMF dual-S-Shaped.	43
Figura 13 – Diagrama esquemático do sensor proposto.	44
Figura 14 – Diagrama da estrutura da fibra SNS	45
Figura 15 – Diagrama da estrutura da fibra SNS	46
Figura 16 – Estrutura MZI e nanopartículas	47
Figura 17 – Diagrama esquemático da configuração experimental para campo magnético	47
Figura 18 – Diagrama esquemático do sistema de detecção de campo magnético proposto	48
Figura 19 – Mapa de ideias dos materiais usados no protótipo.	51
Figura 20 – Diodo laser acoplado a fibra e seu controlador de temperatura	52
Figura 21 – Regiões de operação do laser butterfly	52
Figura 22 – Fotodiodo de Germânio	53
Figura 23 – Setup com fibra multimodo - Descrição: 1 – Laser butterfly; 2 – Fibra monomodo; 3 – Fibra multimodo com palha de aço ; 4 – Bobina; 5 – Fotodiodo; 6 – Circuito eletrônico; 7 – Osciloscópio/multímetro	55
Figura 24 – Circuito do fotodiodo sugerido pelo <i>datasheet</i>	56
Figura 25 – Circuito INA118	57
Figura 26 – Circuito do filtro analógico	57
Figura 27 – Diagrama de blocos do circuito eletrônico	58
Figura 28 – Circuito eletrônico e placa eletrônica em 3D contendo os circuitos do fotodiodo, amplificação, filtro passa faixa e retificador de meia onda.	60

Figura 29 – O campo magnético produzido pela bobina é diretamente proporcional à corrente aplicada nela . A medição foi realizada ao longo do eixo da bobina por um teslameter e a corrente alternada foi injetada usando um variac . As distâncias de 1, 2, 3, 4 e 5 cm são entre a bobina e a ponta de prova do teslameter e as retas no gráfico são ajustes obtidos usando o software gnuplot	61
Figura 30 – Decaimento do campo em razão do aumento da distância. Os pontos são valores experimentais e as linhas são resultado do ajuste de uma função do tipo $a.exp(-bx)$	62
Figura 31 – Sinal visto no osciloscópio sem o uso do circuito eletrônico. A vista superior contém o sinal em termos da tensão em função do tempo e na parte inferior é apresentada a potência no domínio da frequência, cujo sinal possui vários harmônicos	63
Figura 32 – Sinal visto no osciloscópio ao usar o circuito eletrônico contendo o filtro passa faixa, cuja resultante no domínio da frequência é de 120 Hz.	64
Figura 33 – Resposta do sensor em relação à tensão no fotodiodo em função do campo magnético. As linhas de tendência fornecem coeficientes de determinação (R^2) de 0,97 e 0,98 respectivamente para as distâncias de 2 cm e 4 cm.	65
Figura 34 – Resposta do sensor óptico em relação a tensão no fotodiodo em função da corrente elétrica ao fixar as distâncias de 2 cm e 4 cm entre fibra e bobina. Os coeficientes de determinação extraídos da linha de tendência equivalem respectivamente a 0,97 e 0,98.	66
Figura 35 – Variação de potência óptica em função da corrente e do campo medido na bobina. Apesar de os pontos experimentais apresentarem um comportamento logarítmico, a linha de tendência plotada é uma reta que abrange uma escala linear de 4,49 mT a 12,57 mT. Coeficiente de determinação (R^2) igual a 0,97.	68
Figura 36 – Repetição do experimento com distância fixa de 4 cm para demonstrar sua reprodutibilidade. Coeficientes de determinação (R^2) 0,98 e 0,99. A partir de 6 mT os valores do experimento 1 se distanciam dos valores obtidos no experimento 2.	70
Figura 37 – Suporte da Thorlabs para fixação da fibra sensora	71
Figura 38 – Repetição do experimento em termos da corrente e com distância fixa em 4 cm.	72
Figura 39 – Medição de tensão usando Arduino. O experimento foi repetido por 3 vezes a fim de mostrar sua reprodutibilidade.	73
Figura 40 – Suporte de madeira usado para tensionar a fibra e evitar variação de tensão elétrica quando o campo magnético estiver fixo.	74

Figura 41 – Experimento realizado em região multimodo do laser, com corrente fixa em 225 mA. O experimento foi repetido com o objetivo de mostrar a reprodução do experimento usando o suporte de madeira. Nota-se no gráfico uma variação de tensão elétrica menor que 100 mV, o que pode indicar que a fibra estava muito tensionada no suporte.	75
Figura 42 – Experimento realizado em região monomodo do laser, com corrente fixa em 425 mA. Os valores experimentais apresentaram uma variação máxima de 180 mV, um pouco maior ao comparar com o experimento realizado em região multimodo, que no entanto, apresentou melhor reprodução na repetição do experimento.	76
Figura 43 – Circuito eletrônico	88
Figura 44 – Circuito eletrônico do filtro passa faixa	89
Figura 45 – Resposta no domínio da frequência para a simulação do filtro passa faixa . .	89
Figura 46 – Circuito do retificador de precisão usado para retirar a componente negativa do sinal de forma a evitar danos no arduino.	90
Figura 47 – Simulação do retificador de precisão. Na entrada do circuito é colocado um sinal simétrico (amarelo), e na saída é obtida a resposta do sinal retificado (azul) sem a queda de tensão que acontece nos retificadores convencionais.	91
Figura 48 – Montagem Arduino e superdiodo	92
Figura 49 – Comparação da tensão medida no Arduino e no multímetro	93

Lista de tabelas

Tabela 1	– Estudo comparativo dos resultados da revisão bibliográfica	49
Tabela 2	– Especificações dos materiais que compõem o setup	54
Tabela 3	– Campo magnético (mT) em função da corrente I e da distância entre o sensor e a face lateral da bobina.	62
Tabela 4	– Tensão em função da variação de campo magnético e corrente referente as distâncias de 2 cm e 4 cm entre fibra e bobina.	67
Tabela 5	– Potência em função do campo magnético com distância fixa de 4 cm entre a fibra e a bobina.	68
Tabela 6	– Estudo comparativo dos resultados da revisão bibliográfica.	69
Tabela 7	– Tensão em função da variação de campo magnético e da corrente	71
Tabela 8	– Tensão elétrica em função da variação de campo magnético.	73
Tabela 9	– Tensão em função da variação de campo magnético para as regiões multimodo e monomodo	76

Lista de abreviaturas e siglas

AN	abertura numérica
BBS	do inglês, broadband source
CA	corrente alternada
CC	corrente contínua
DMD	do inglês, difference mode delay
FFT	do inglês, fast fourier transform
FM	fluido magnético
GVD	do inglês, group velocity dispersion
HOF	do inglês, hollow optical fiber
IMM	interferência multimodal ou modal
IR	índice de refração
ISI	interferência entre símbolos
Laser	do inglês, light amplification by stimulated emission of radiation
LCD	do inglês, liquid crystal display
LED	do inglês, light emitting diode
LT	linhas de transmissão
MCED	medidor de campo eletromagnético digital
MEF	método dos elementos finitos
MFC	do inglês, microfiber coupler
MM	multimodo
MMF	multi-mode fiber
MMFI	do inglês, microfiber mode interferometer
MZI	do inglês, mach-zehnder interferometer

NCF	do inglês, no core fiber.
OSA	do inglês, optical spectrum analyzer
PCB	do inglês, printed circuit board
PCF	do inglês, photonic crystal fiber
SBS	do inglês, supercontinuum broadband source
SMF	do inglês, single-mode fiber
SMS	do inglês, single-mode - multimode - single-mode

Lista de símbolos

n	Índice de refração do meio
c	Velocidade da luz
δT	Diferença de atraso
Δ	Diferença relativa do índice de refração
λ	Comprimento de onda

Sumário

1	INTRODUÇÃO	21
1.1	Motivação	22
1.2	Objetivos	23
1.2.1	Objetivo Geral	23
1.2.2	Objetivos específicos	23
1.3	Produção científica	24
1.4	Organização da Dissertação	24
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	26
2.1	Fibra Óptica	26
2.1.1	Fibra multimodo de índice degrau	27
2.1.2	Fibra multimodo de índice gradual	28
2.1.3	Dispersões em fibras ópticas	28
2.1.3.1	Dispersão Modal	29
2.1.3.2	Dispersão Cromática	31
2.1.3.3	Efeito da diferença de atraso entre modos	32
2.1.4	Interferência Modal	32
2.2	Sensores ópticos	36
2.3	Sensores de fibra óptica	36
2.4	Metodologia de busca e seleção dos trabalhos	38
2.4.1	Sensores ópticos de medição de campo magnético	40
2.5	Conclusão	49
3	METODOLOGIA	51
3.1	Materiais utilizados	51
3.1.1	Laser <i>butterfly</i>	52
3.1.2	Fibra óptica multimodo	53
3.1.3	Fotodiodo	53
3.1.4	Osciloscópio	53
3.1.5	Multímetro	53
3.1.6	Teslameter	54
3.2	Especificações dos componentes do <i>setup</i>	54
3.3	Montagem do protótipo	54
3.3.1	Circuito eletrônico para aquisição de dados	56
3.4	Testes efetuados no protótipo	58
3.5	Conclusão	59

4	RESULTADOS	60
4.1	Placa eletrônica	60
4.2	Validação da bobina	60
4.2.1	Experimentos utilizando o sensor com fibra multimodo	63
4.3	Resultados experimentais usando o sensor	64
4.3.1	Estudo comparativo do sensor com relação ao estado da arte	68
4.3.2	Reprodutibilidade de experimentos	70
4.3.3	Medição de tensão com Arduino	72
4.3.4	Correção da reprodutibilidade do sensor e exploração das regiões monomodo e multimodo do laser	73
4.4	Conclusão	77
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	78
5.1	Trabalhos Futuros	78
	REFERÊNCIAS	80
	APÊNDICES	84
	APÊNDICE A – CÓDIGO DO ARDUÍNO PARA MEDIR TENSÃO	85
	ANEXOS	87
	ANEXO A – CIRCUITO ELETRÔNICO	88
	ANEXO B – FILTRO PASSA FAIXA SIMULADO NO MULTISIM	89
	ANEXO C – SUPERDIODO	90
	ANEXO D – CIRCUITO COM ARDUINO	92
	ANEXO E – TESTE EXPERIMENTAL USANDO ARDUINO	93

1 Introdução

Sensores ópticos baseados em fibras ópticas estão sendo amplamente explorados desde que surgiram em paralelo com as comunicações ópticas, e são usados para detecção e monitoramento dos mais diferentes parâmetros, sejam eles grandezas físicas, químicas ou biológicas (SILVA JR, 2016). Suas aplicações estão difundidas em diferentes campos de estudo, como por exemplo, no sensoriamento de nível de líquido (RAJAMANI; DIVAGAR; SAI, 2019), detecção de campo magnético (DENG; LIU; LI, 2014), temperatura (ERLEI et al., 2018), pressão (ZHOU et al., 2017), entre outros.

Ao serem comparadas com os fios de cobre, as fibras ópticas apresentam interessantes características de imunidade a ruídos eletromagnéticos externos, alta velocidade de transmissão, alta capacidade de multiplexação, o que permite realizar diversas medições em um único canal de transmissão, também possuem baixa atenuação para as fibras atuais, ampla faixa de espectro e dimensões reduzidas (VARGHESE et al., 2011). Além disso, os sensores ópticos podem ser utilizados para realizar medição em ambientes mais críticos de temperaturas elevadas, inflamáveis e úmidos, se destacando nos projetos de sensoriamento de corrente e campo magnético (SUGAWARA, 1997).

Em relação aos métodos ópticos explorados para medir corrente e campo magnético, são encontradas diferentes abordagens na literatura. Um dos efeitos mais conhecido e aplicado para esse fim é o efeito Faraday, responsável por causar rotação do plano de polarização que é linearmente proporcional ao componente do campo magnético na direção de propagação. Também pode ser usado para medir a corrente que flui através de um fio, pois é proporcional ao campo magnético (BRENA; HORCHE; MINGUEZ, 2012).

Outra abordagem de medição do campo magnético é realizada pela mudança do índice de refração do meio ao redor da fibra. Essa variação no índice pode ser alcançada usando um fluido magnético (FM), no qual a fibra será embutida. Esta estrutura geralmente utiliza rede de Bragg de fibra gravada, ligações em série de fibras multimodo e monomodo e fibras de cristal fotônico (PCF - *photonic crystal fibers*) (DAI et al., 2011).

Um dos primeiros sensores a fibra óptica inventado foi o giroscópio, e pode ser considerado o marco inicial na área da instrumentação, pois foi possível demonstrar que se podiam construir interferômetros ópticos totalmente baseados em fibras ópticas (CUNHA, 2007).

O uso de interferômetros na aplicação de sensores, de acordo com a literatura, já é bem estabelecido. Partindo de uma das descobertas mais importantes do meio científico, o interferômetro de Michelson foi um dos propulsores que possibilitou, séculos depois, a firmar a teoria da relatividade, pois através deste experimento foi possível comprovar que a velocidade da luz é constante independente do referencial, mesmo não sendo esse o propósito dos experimentos

propostos por Michelson-Morley (PIMENTEL JR, 2012).

Na literatura são encontradas algumas aplicações dos interferômetros para sensoriamento, como por exemplo, em medições de grandezas físicas de natureza variada, na caracterização de materiais e em medições de deslocamentos e vibrações. São extremamente sensíveis a pequenas variações ao serem comparados com os sensores convencionais.

Os interferômetros são dispositivos capazes de causar uma sobreposição em dois campos eletromagnéticos, neste caso, feixes de luz interferem-se de tal forma que o resultado final será a alteração de suas amplitudes. Essa alteração dependerá da defasagem entre esses campos e a amplitude deles, que resultará em um padrão de interferência, seja ele construtivo ou destrutivo.

Alguns interferômetros são bastante conhecidos na literatura, como por exemplo, interferômetro de Michelson, Fabry-Perot, Mach-Zehnder, e Sagnac.

Partindo da ideia e da aplicação da interferometria, surgem os interferômetros modais, os quais estão sendo amplamente empregados em sistemas ópticos de detecção e comunicação, podemos encontrar nas bases de dados científicas uma faixa numerosa de trabalhos que utilizam PCFs para tais aplicações (BIRKS; KNIGHT; RUSSELL, 1997; RUSSEL, 2003; DASH; JHA, 2015; QIAN et al., 2012).

As PCFs são caracterizadas pelo arranjo periódico dos furos de ar no revestimento, o que aumenta a flexibilidade na adaptação das propriedades ópticas da luz. No entanto, os custos de fabricação das PCFs as tornam bastante caras quando comparadas com as fibras convencionais de sílica.

Uma outra alternativa para se trabalhar com interferometria modal, no entanto, com menores custos, é utilizando fibras ópticas multimodo. Os efeitos de dispersão são capazes de causar interferências entre os distintos modos de propagação. Alguns trabalhos apontados na literatura exploram a interferência de modos para sensorear multiparâmetros, ou seja, quando diferentes partes do comprimento de uma fibra são utilizadas para medir distintas grandezas.

1.1 Motivação

O controle de corrente elétrica se faz necessário por alguns fatores fundamentais, como por exemplo, na medição precisa do consumo e identificação rápida de falhas em sistemas de energia. Em ambientes mais hostis que demandam maior temperatura, como é o caso de transformadores que podem sofrer danos facilmente pelo calor e curtos circuitos. Desta forma, faz-se necessário empregar sistemas de proteção que requerem manutenção recorrente (EL-KHOZONDAR H.J.; MULLER, 2012).

Fazer manutenção preventiva reduz os riscos de danos estruturais, operacionais e também evita desgastes desnecessários dos componentes, o que pode também diminuir as possibilidades de causar acidentes. Para isso, é importante monitorar algumas grandezas, dentre elas, a corrente

elétrica e o campo magnético. Um ponto importante que se faz necessário controlar a corrente é em linhas de transmissão (LT) de energia, pois chegam a operar tensões acima de 500 kV.

Já os sensores utilizados para medir campo magnético possuem suma importância em áreas como computação, armazenamento de dados, na obtenção de imagens médicas como a ressonância, em pesquisas geofísicas e na indústria. Os sensores ópticos têm ganhado destaque quando se trata de medir tais grandezas, pois, conforme citado anteriormente, se mostram imunes a interferências externas.

Em redes de energia elétrica, os transformadores desempenham um papel importante na regulação de tensão, neste caso, funcionam como elevadores e abaixadores de tensão, garantindo a qualidade tanto na transmissão como na distribuição de eletricidade. Desta forma, faz-se necessário realizar um monitoramento em relação aos transformadores, pois dentro deles existe um campo magnético nominal que é substancial para seu funcionamento, Em algumas situações esse campo sofre variações que podem comprometer sua operação e a das linhas de transmissão (BECHARA, 2010).

Na literatura é possível encontrar vários sensores ópticos, ou mais especificamente, sensores a fibra óptica que se propõem a medir campo magnético (ASCORBE; CORRES, 2017). Estes sensores utilizam diferentes fenômenos físicos para medir campo magnético externo, seja utilizando interferometria (SOUZA et al., 2018), ou associação de materiais magnetostrictivos a rede de Bragg (YANG et al., 2017), entre outros. Nesta pesquisa, será apresentado e discutido um sensor óptico de medição de corrente e campo magnético baseado nos efeitos de interferência modal .

1.2 Objetivos

Tomando como ponto de partida a motivação citada acima, serão apresentados a seguir os objetivos relacionados a presente pesquisa.

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo desta dissertação de mestrado é apresentar o desenvolvimento de um sensor interferométrico modal para a medição de corrente elétrica e campo magnético aplicando os princípios de modulação da luz por meio da interferência multimodal (IMM), a qual se relaciona com os efeitos lineares de dispersão.

1.2.2 Objetivos específicos

- Aplicar o efeito da interferência multimodal como metodologia na medição de corrente elétrica e campo magnético;

- Desenvolver um sensor óptico para medir corrente e campo magnético alternados;
- Desenvolver a instrumentação eletrônica necessária para processamento do sinal de saída;
- Calcular e avaliar a sensibilidade do sensor;
- Comparar a sensibilidade do sensor com outros da literatura;

1.3 Produção científica

Durante o desenvolvimento do presente trabalho de mestrado, os seguintes artigos científicos foram publicados, a saber:

- Eventos

MAIA, L. S. P., MIRANDA, M. A., SOUZA, I. M. X., SASAKI, J. M., GUIMARÃES, G. F. Sensor Óptico de Corrente e Campo Magnético Alternador Utilizando Interferômetro Sagnac com Aço Carbono. Simpósio de Lasers e Suas Aplicações, 2019.

SOUZA, I. M. X., MAIA, L. S. P., MIRANDA, M. A., SASAKI, J. M., GUIMARÃES, G. F. Interferometria com fibra óptica aplicada ao sensoriamento de corrente elétrica. Simpósio de Lasers e Suas Aplicações, 2019.

- Artigo em andamento da dissertação

Optical Current and Magnetic Field Sensor Using Multimodal Interference in Fiber Optical with Carbon Steel.

- Publicações não relacionadas a dissertação

SOUZA, Clenilson; MAIA, Luana; MEDEIROS, Guilherme; MIRANDA, Marcus; GUIMARÃES, Glendo. Optical current and magnetic field sensor using mach-zehnder interferometer with nanoparticles. *IEEE Sensors Journal*, v. 18, p. 7998 – 8004, 2018. ISSN: 0030-4026.

MAIA, Luana; MARCELINO, Lucas; NEGREIROS JÚNIOR, José ; CAVALCANTE, Daniel ; GUIMARÃES, Glendo. Promovendo o curso de engenharia de telecomunicações no ensino médio com abordagem hands-on: relato de caso. *Brazilian Journal Of Development*, [s.l.], v. 6, n. 3, p. 9883-9893, 2020. *Brazilian Journal of Development*. <http://dx.doi.org/10.34117/bjdv6n3-024>.

1.4 Organização da Dissertação

Esta dissertação está estruturada em 5 capítulos na seguinte sequência: Introdução, Fundamentação Teórica, Metodologia, Resultados e Considerações Finais.

O Capítulo 2 trata do embasamento teórico acerca das fibras ópticas e descreve os efeitos lineares de dispersão atuantes nesta. Também será apresentada a base conceitual do sensor empregando interferência multimodal em fibras ópticas. Serão abordados os trabalhos encontrados na literatura que se propuseram a desenvolver sensores a fibra óptica para mensurar diferentes grandezas e aqueles trabalhos desenvolvidos nos últimos 5 anos que possuem o mesmo foco deste trabalho, ou seja, sensores interferométricos desenvolvidos para medir corrente e campo magnético, e ainda, quais os critérios utilizados para escolha dos trabalhos descritos no estado da arte.

Em seguida, no Capítulo 3, é apresentado o sensor de corrente/campo magnético empregando interferência modal. Foi realizada uma descrição detalhada sobre a metodologia utilizada durante os experimentos realizados em laboratório. Neste capítulo é possível ver um mapa de ideias que caracteriza os materiais que compõem o protótipo de bancada, e como foram coletados os dados. Nesta seção ainda foi descrita a montagem do *setup* experimental e como foram realizados os testes de bancada.

No Capítulo 4 são apresentados os resultados relativos a medição de corrente/campo magnético com uma descrição e análise dos dados coletados na execução dos experimentos do protótipo de bancada. Também é realizada uma comparação entre os trabalhos relatados no estado da arte e o estudo em questão.

O Capítulo 5 descreve as considerações finais e uma conclusão geral, ressaltando as principais contribuições deixadas durante este trabalho de mestrado. Por fim, sugestões para trabalhos futuros são apresentadas.

2 Fundamentação Teórica

Neste capítulo serão abordados os efeitos de linearidade que se manifestam no interior de uma MMF quando um pulso luminoso se propaga pelo núcleo. Também será apresentada a base conceitual do sensor com foco na interferência multimodal em fibras ópticas. Além de apresentar em um estudo comparativo o estado da arte dos trabalhos desenvolvidos nos último 5 anos que se propuseram a medir campo magnético pelo método de interferência, seja em interferômetros ou em fibras com multi percursos.

2.1 Fibra Óptica

A invenção do laser (*light amplification by stimulated emission of radiation*) possibilitou desenvolver novos meios para usar a luz como meio de transmissão de dados. Em 1966 foi sugerido que a luz pudesse ser confinada em fibras ópticas, dado que estas eram capazes de guiar a luz de modo similar ao guiamento de elétrons em um fio de cobre (AGRAWAL, 2010), no caso das fibras, pacotes de luz que são chamados de fótons.

Com o avanço da tecnologia temos hoje vários dispositivos que são feitos de fibras ópticas, e a necessidade de conhecer e aplicar tais dispositivos tem levado muitos pesquisadores a melhorar o desempenho de componentes ópticos, como por exemplo os interferômetros do tipo em fibras ópticas convencionais. Antes da chegada da década de 70, as fibras eram inicialmente utilizadas na obtenção de imagens médicas em curtas distâncias (DUTTA; STROSCIOS, 2000), somente em 1970 quando o laser foi inventado, as fibras passaram a ser usadas em outras aplicações, como por exemplo, na fabricação de sensores (UDD; SPILLMAN, 2011).

É visto que cada vez mais se necessita que os dados sejam transmitidos e processados com maiores velocidades e mais segurança, e com o advento e avanço das fibras ópticas isto vem tornando-se realidade, tendo em vista que o sinal transportado em seu núcleo são pulsos de ondas eletromagnéticas.

Fibras ópticas geralmente são produzidas primariamente a partir de sílica, o que torna sua estrutura com características dielétricas. Possuem um núcleo e uma casca que o reveste com índice de refração que difere dele, ou seja, o índice de refração do núcleo é maior que o da casca, o que torna possível o confinamento da luz, fenômeno conhecido como reflexão interna total. Para que ocorra tal fenômeno, a luz deve sair de um meio com índice de refração maior para um meio com menor índice de refração, e o ângulo de incidência deve ser superior ao ângulo crítico (medido em relação à interface do núcleo e seu revestimento) permitindo que um raio de luz sofra sucessivas reflexões (GONÇALVES, 2012).

A diferença entre índices de refração é realizada com a dopagem do núcleo ou da casca

ou de ambos com material apropriado. Dopantes como dióxido de germânio e pentóxido de fósforo (GeO_2 e P_2O_5) aumentam o índice de refração da sílica e são adequados para o núcleo. Por sua vez, dopantes como trióxido de boro (B_2O_3) e flúor diminuem o índice de refração da sílica e são adequados à casca (AGRAWAL, 2010). Além do núcleo e da casca, as fibras recebem um revestimento externo polimérico, filme metálico ou acrilato, que é o mais utilizado, que servem para isolar e proteger o material vítreo.

As fibras ópticas podem ser classificadas de acordo com os modos de propagação. O número de modos da fibra está diretamente relacionado com o diâmetro do núcleo e inversamente proporcional ao comprimento de onda utilizado (TRONCO; ÁVILA, 2007). Quanto aos modos, as fibras são classificadas da seguinte maneira:

- **Monomodo:** possuem um núcleo reduzido, de fato, as fibras monomodo suportam apenas um modo de propagação, também conhecido como o modo fundamental (AGRAWAL, 2002). Transmitem luz proveniente do uso de laser em diferentes comprimentos de onda.
- **Multimodo:** o pulso luminoso de entrada excita vários modos de propagação, pois este tipo de fibra possui um diâmetro de núcleo mais largo em comparação com as fibras monomodo, desta forma, a luz pode se propagar por diferentes caminhos. A fonte de luz utilizada geralmente são diodos emissores de luz (LED - *light emitting diode*).

As fibras multimodo são subdivididas em índice gradual e índice degrau. Uma descrição sobre essas subdivisões é feita a seguir.

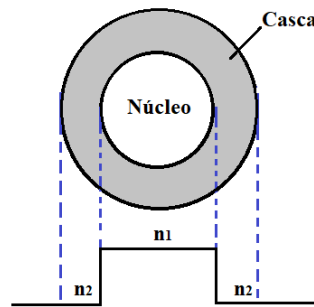
2.1.1 Fibra multimodo de índice degrau

Fibras desse tipo possuem um diâmetro razoavelmente maior e abertura numérica (AN; capacidade de captação luminosa da fibra óptica) grande para facilitar o acoplamento da luz proveniente de fonte incoerente, como é o caso dos LEDs. Sua fabricação, geralmente possui compostos de vidro ou sílica dopada. Possuem um diâmetro de núcleo situado em uma faixa de $100\ \mu\text{m}$ a $300\ \mu\text{m}$ (SENIOR, 2009).

Nesse tipo de fibra ocorre variação abrupta do índice de refração do núcleo com relação a casca. São utilizadas em sistemas com comprimento de onda típico: 850 nm e 1330 nm e distâncias típicas de aplicação de até 1 km. Uma estrutura típica é ilustrada na Figura 1, em que n_1 e n_2 representam os índices de refração do núcleo e casca, respectivamente, os quais possuem valores diferentes.

Considerando-se as dimensões típicas e o material usual de fabricação de uma fibra multimodo de índice degrau, estas caracterizam-se pela existência de vários modos de propagação. O grande número de modos resulta em um aumento dos efeitos lineares conhecidos como dispersão, os quais serão melhores detalhados na seção seguinte.

Figura 1 – Fibra de índice degrau



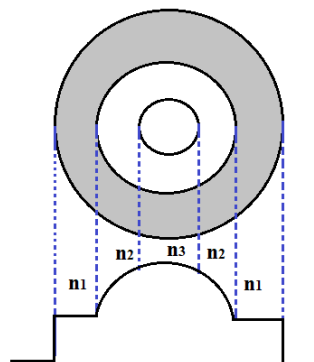
Fonte: autora.

2.1.2 Fibra multimodo de índice gradual

Em fibras multimodo de índice gradual ocorre variação gradual do índice de refração do núcleo com relação à casca, logo, n_1 , n_2 e n_3 não possuem valores iguais. Também são geralmente fabricadas utilizando compostos de vidro ou sílica dopada, porém, são materiais mais puros, de forma a diminuir as perdas. Possuem maior capacidade de transmissão quando comparadas com as MMF - índice degrau. Com menor diâmetro de núcleo (50μ a 100μ), possuem menor aceitação de energia luminosa.

As fibras de índice gradual são utilizadas em sistemas de comunicação com distâncias de poucos quilômetros, operam com comprimento de onda típico de 850 nm a 1330 nm. Na Figura 2 é mostrada uma estrutura típica referente a fibra de índice gradual (SENIOR, 2009).

Figura 2 – Fibra de índice gradual



Fonte: autora.

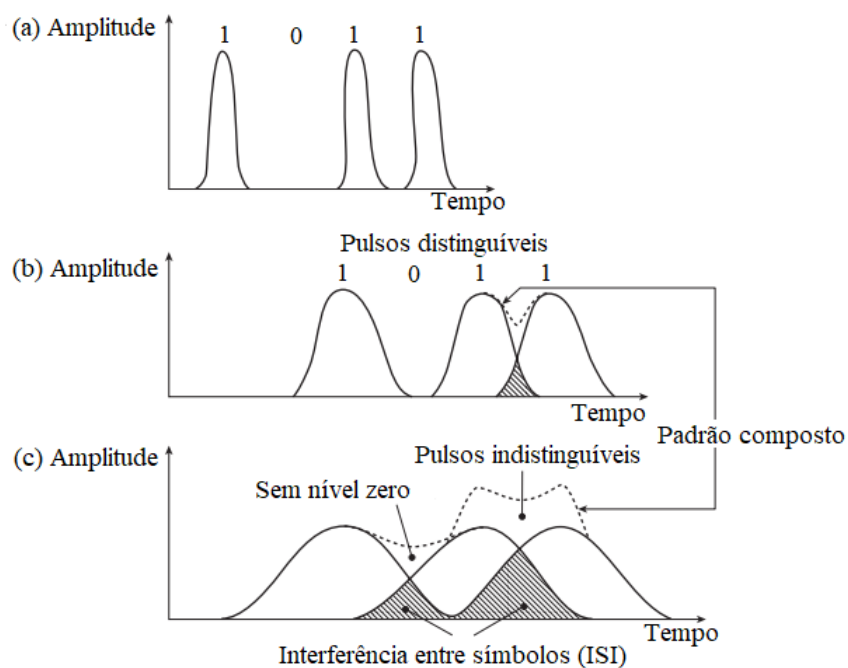
2.1.3 Dispersões em fibras ópticas

O sinal transmitido por uma fibra sofre com alguns fenômenos que são inerentes a propagação deste em um meio dielétrico, como por exemplo, efeitos não lineares e efeitos lineares. Neste trabalho, como o laser opera em uma potência significativamente baixa, podemos considerar apenas os efeitos de linearidade, os quais são: atenuação e dispersão.

O termo dispersão é utilizado para descrever o efeito de alargamento dos pulsos que se propagam pelas fibras e pode ser do tipo: dispersão modal, dispersão cromática e dispersão por modo de polarização. É responsável por causar distorção digital e analógica do pulso de entrada ao longo do caminho óptico. Os mecanismos de dispersão causam um aumento da largura temporal dos pulsos luminosos à medida que se propagam pelo canal, cada pulso é ampliado e se sobrepõe aos pulsos vizinhos, tornando-se indistinguíveis na saída da fibra, a largura de banda máxima é limitada pela dispersão causada no sinal (SENIOR, 2009).

Na Figura 3 é apresentada uma ilustração usando o padrão de bit digital 1011 da ampliação da largura temporal dos pulsos de luz à medida que são transmitidos ao longo de uma fibra, onde pode-se observar que cada pulso se amplia e se sobrepõe aos seus vizinhos, eventualmente se tornando indistinguível na entrada do receptor. O efeito é conhecido como interferência entre símbolos (ISI).

Figura 3 – Pulsos de luz à medida que são transmitidos ao longo de uma fibra: (a) entrada de fibra; (b) alargamento temporal do pulsos (c) Alargamento temporal e interferência entre pulsos.



Fonte: SENIOR (2009)

Perceba na Figura 3 que o sinal chegará na extremidade da fibra espalhado em relação ao tempo, assim, pode-se concluir que a interferência entre símbolos é a diferença entre a largura de banda do impulso na entrada e sua correspondente largura de banda na saída da fibra.

2.1.3.1 Dispersão Modal

A dispersão modal é causada pela diferença dos tempos de propagação dos diferentes modos. Esta dispersão que nada mais é do que a ampliação do pulso luminoso, ocorre apenas em

fibras multimodo, pois é resultado das diferenças no atraso de propagação entre os modos no interior destas (GONÇALVES, 2012).

A manifestação desse tipo de dispersão é mais notada em fibras multimodo de índice degrau do que nas de índice gradual, pois proporcionam maior ampliação temporal do pulso durante sua propagação. Em fibras puramente monomodo não ocorre este tipo de dispersão, portanto, o alargamento dos pulsos nestas se devem aos efeitos de dispersão cromática, o qual será descrito mais adiante.

Ao ser injetado em uma MMF, o pulso de luz excita vários modos de propagação, fazendo com que cada modo transporte uma parcela da energia total transmitida que não necessariamente é igual para cada um.

Diferentes raios viajam por percursos de diferentes comprimentos. Em consequência, na saída da fibra, esses raios se dispersam no tempo, ainda que coincidam na entrada e viajem com a mesma velocidade ao longo da fibra. Um pulso curto (chamado de impulso) se alargaria consideravelmente, devido aos diferentes comprimentos de percursos. Podemos estimar o alargamento temporal dos pulsos considerando os raios que viajam pelos percursos de menor e de maior comprimento (AGRAWAL, 2010).

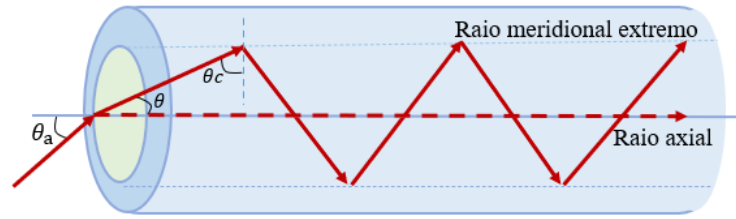
De acordo com a teoria dos raios, os modos mais rápidos e mais lentos podem ser representados por um raio axial e um raio meridional (raio incidente na interface núcleo-revestimento), respectivamente, conforme mostrado na Figura 4. A diferença de atraso entre os dois raios permite definir o alargamento do pulso resultante da dispersão no núcleo da fibra. Como os dois raios viajam no interior do núcleo com a mesma velocidade, a diferença de atraso é devido os comprimentos de caminhos percorridos pelos raios serem diferentes (SENIOR, 2009). O tempo necessário para o raio axial percorrer uma fibra de extensão L fornece o tempo de atraso mínimo T_{Min} , definido pela Equação 2.1.

$$T_{Min} = \frac{d}{v} = \frac{L}{c/n_1} = \frac{Ln_1}{c}, \quad (2.1)$$

em que, n_1 é o índice de refração do núcleo e c é a velocidade da luz no vácuo. O raio meridional extremo exhibe o tempo de atraso máximo T_{Max} , que é obtido pela Equação 2.2.

$$T_{Max} = \frac{L/\cos\theta}{c/n_1} = \frac{Ln_1}{c\cos\theta}. \quad (2.2)$$

Figura 4 – Modos de propagação em fibra multimodo de índice degrau



Fonte: autora.

Após algumas deduções matemática descritas por Senior (2009), e com aplicação da lei de Snell na interface núcleo-revestimento é possível obter a Equação 2.4.

$$\text{sen}\theta_c = \frac{n_2}{n_1} = \cos\theta, \quad (2.3)$$

$$T_{Max} = \frac{Ln_1^2}{cn_2}. \quad (2.4)$$

A diferença de atraso (δT_s) entre o raio meridional extremo e o raio axial pode ser obtida subtraindo $T_{Max} - T_{Min}$, consequentemente, substituindo as Equações 2.1 e 2.4 em δT_s , obtêm-se a Equação 2.6.

$$\delta T_s = \frac{Ln_1^2}{cn_2} \left(\frac{n_1 - n_2}{n_2} \right), \quad (2.5)$$

$$\delta T_s = \frac{Ln_1^2}{cn_2} \Delta. \quad (2.6)$$

A equação 2.6 permite calcular o alargamento do pulso resultante da dispersão no núcleo da fibra, em que Δ corresponde a diferença relativa entre o índice de refração da casca e do núcleo.

2.1.3.2 Dispersão Cromática

Também conhecida como dispersão da velocidade de grupo (GVD - *group velocity dispersion*), a dispersão cromática está dividida em dois tipos: dispersão material e dispersão do guia de onda. Trata-se do resultado da largura de linha espectral finita da fonte óptica, pois, como as fontes ópticas não emitem uma única frequência, mas uma banda de frequências distintas, pode haver uma defasagem entre os sinais de propagação com relação aos diferentes componentes espectrais do sinal transmitido. Essa diferença no atraso de propagação ocasiona o alargamento de cada modo transmitido na fibra (SENIOR, 2009).

A dispersão cromática também pode ser explicada de acordo com a relação do índice de refração da sílica (vidro) utilizado no núcleo da fibra, ser dependente da frequência óptica.

Devido a isto, diferentes frequências atravessando a fibra a diferentes velocidades, resultam em diferentes atrasos, como ocorre na dispersão modal.

A dispersão cromática não manifesta-se apenas em MMFs, mas também em fibras monomodo, nesta, a energia do sinal é confinada em um único modo, no entanto, as diferentes componentes espectrais do pulso viajam com velocidades ligeiramente diferentes, daí o nome, velocidade de grupo (AGRAWAL, 2010).

2.1.3.3 Efeito da diferença de atraso entre modos

De acordo com Elias (2012), sensores que utilizam MMF tem seu funcionamento baseado na modulação de intensidade da luz guiada por meio de mecanismos que não envolvem interferometria. O que ocorre na verdade são as dispersões modais e cromáticas.

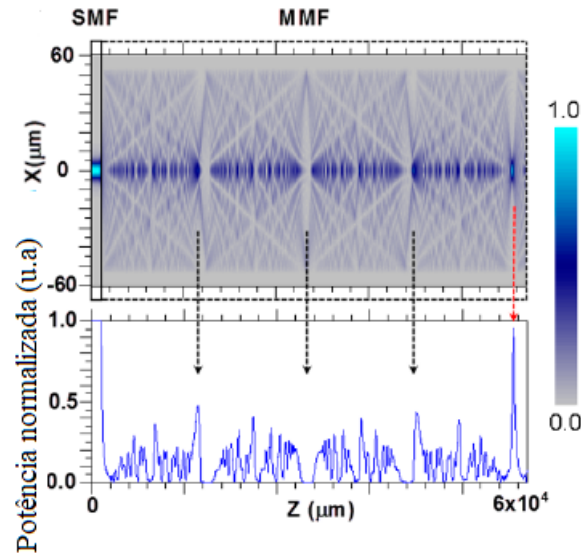
Nas MMFs acontece o efeito que é denominado de DMD (*differential mode delay* ou diferença de atraso entre os modos excitados), isso acontece porque em fibras MM, um pulso de luz é capaz de excitar vários modos de propagação, desta forma, esses modos seguem diferentes caminhos no interior da fibra. Os caminhos podem ter diferentes comprimentos e a transmissão deles sofre atrasos enquanto a luz se propaga pela fibra, conforme foi descrito pelos efeitos de dispersão. Quando ocorre DMD, um pulso distinto que se propaga pela fibra não é mais distinto. Os modos tendem a interferir uns nos outros provocando alta dispersão modal.

É importante ressaltar que o DMD é efetuado no domínio do tempo. Trata-se de um efeito que é mais perceptível em fibras que possuem AN maiores, como é o caso das MMF, e principalmente, quando estas operam com comprimentos de onda fora do seu perfil de otimização.

2.1.4 Interferência Modal

O fenômeno IMM é inerente aos guias de onda multimodo, em que os modos excitados se interferem à medida que se propagam ao longo de uma MMF, em função disso, um padrão de interferência é produzido ao longo da MMF, e auto imagens se formam em locais específicos, conforme mostra-se na Figura 5 (FUENTES-FUENTES et al., 2015). Pode-se observar que em certas posições a luz se concentra ao longo do eixo da MMF, indicado pelas setas na Figura 5, e elas também apresentam um comportamento periódico. Isso ocorre em posições em que a diferença de fase entre os modos de propagação é um múltiplo inteiro de 2π . Também é possível notar que as perdas de inserção diminuem consideravelmente na quarta imagem, indicada pela seta vermelha. Essa é a auto imagem geralmente usada em dispositivos IMM.

Figura 5 – Fenômeno da interferência multimodo



Fonte: Modificada de Fuentes-Fuentes et al. (2015)

Fuentes-Fuentes et al. (2015) demonstram que não é necessário utilizar uma fibra especial, mas que os efeitos da IMM poderiam ser observados também em uma MMF padrão.

Ao tratarmos a luz como uma onda, seu comportamento será regido pelas equações básicas do eletromagnetismo, as equações de Maxwell. Desta forma, ao resolver as equações propostas por Maxwell e aplicando as condições de contorno da fibra que é um guia de onda (tais como diâmetro do núcleo, comprimento de onda, abertura numérica, etc.) é possível encontrar um número de soluções finitas que satisfaçam tais equações (KEISER, 2014). E assim, pode-se dizer que a luz não se propaga de forma aleatória no interior da fibra, mas é canalizada em um número específico de modos.

Cada modo irá transportar uma parcela individual (mas não igual) da energia total transmitida. Pode-se definir os modos como sendo caminhos que a luz pode percorrer no interior do núcleo da fibra. O número de modos está relacionado com o parâmetro V , que é a frequência normalizada e um número adimensional, definido na Equação 2.7 (KEISER, 2014):

$$V = \frac{2\pi a AN}{\lambda}, \quad (2.7)$$

em que a é o raio do núcleo e AN é a abertura numérica da fibra. Para uma MMF de índice degrau, a relação da frequência normalizada com o número de modos é dada a seguir

$$M = \frac{V^2}{2}. \quad (2.8)$$

Os interferômetros modais geralmente são construídos a partir da junção de uma MMF ligada entre duas SMF, caracterizando uma configuração SMS (do inglês, "single-mode - multi-

mode - single-mode"). Nestes, ocorre interferência dos modos de propagação de luz devido a diferença de caminho óptico percorrida pelo pulso de luz ao viajar no interior de uma MMF.

O objetivo é fazer com que o modo que se propaga no núcleo da fibra monomodo seja transmitido para o interior de uma fibra multimodo, e sendo posteriormente transmitido para o núcleo da segunda fibra monomodo, quando os modos são recombinados formam um padrão de interferência devido ao atraso sofrido entre eles (ASCORBE; CORRES, 2017). Qualquer alteração nos modos que se propagam na casca da MMF é capaz de alterar o padrão de interferência, assim como o espectro de transmissão gerado na saída da fibra.

Ao acoplar a fibra monomodo na multimodo, um pulso de luz propagado em um único modo pode excitar vários dos diversos modos que constituem a MMF. A propagação de vários modos simultâneos pode provocar alta interferência modal, apresentadas por interferências construtivas e destrutivas ao longo da direção de propagação do canal (COSTA, 2019).

A maioria dos trabalhos encontrados na literatura, conforme será mostrado na subseção 2.4, utilizam o fluido magnético (FM) como elemento sensor de campo magnético. O objetivo é causar uma alteração no espectro de transmissão, ou seja, um deslocamento no comprimento de onda do sinal. Nesse caso, a MMF é colocada no interior de um tubo capilar preenchido com FM, a propagação dos modos na casca gera uma onda evanescente que se propaga na interface casca-fluido, e é modulada pelas variações físicas sofridas pelo fluido devido a presença do campo magnético (CHEN et al., 2013; ZU et al., 2012).

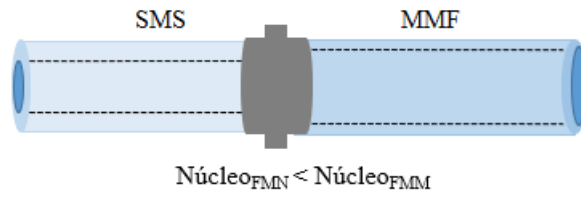
Essa estrutura opera devido à interferência multimodal dos modos guiados na seção da MMF sob o princípio da formação de auto imagem. A auto imagem consiste na replicação, geralmente no final da seção da MMF, do perfil de campo de sua entrada (ULRICH, 1975).

Sensores de interferência modal são ainda mais compactos comparados com os demais que também utilizam fibra óptica, pois são formados por uma seção de fibra mais curta.

O presente trabalho difere um pouco das estruturas já estabelecidas, ao contrário das SMS, a configuração é formada apenas por uma seção de fibra monomodo ligada em uma seção de fibra multimodo.

Conforme citado anteriormente, a MMF é capaz de transmitir vários modos guiados, dessa forma, um campo acoplado da SMF para a MMF pode resultar em uma ou mais imagens devido ao padrão de interferência. Na Figura 6 é apresentada a estrutura da SMF - MMF, em que o perfil de entrada pode ser produzido na junção do guia de ondas monomodo e o guia de ondas multimodo, na estrutura acopla-se uma fibra monomodo com menor diâmetro à uma fibra multimodo que possui diâmetro maior. Já na Figura 7 é ilustrado o caminho que a luz percorre ao ser transmitida de uma fibra monomodo para uma multimodo.

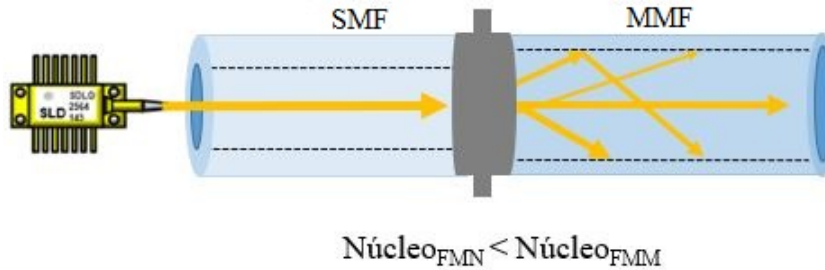
Figura 6 – Arranjo de uma configuração SMF - MMF



Fonte: autora.

A diferença de fase entre os modos de propagação na fibra multimodo deve ser um múltiplo inteiro igual a 2π para produção de uma única imagem (MEJIA-ARANDA et al., 2013). Dessa forma, cada um dos modos pode interferir na fase e consecutivamente no campo de entrada.

Figura 7 – Caminhos que a luz percorre no interior da estrutura SMF-MMF



Fonte: autora.

As imagens produzidas se formarão em uma distância L determinada pela Equação (2.9), em que p se refere ao número de imagens formadas e L_π é a largura do pulso

$$L = p \left(\frac{3}{4} L_\pi \right), p = 0, 1, 2, \dots \quad (2.9)$$

Para $p = 0$ haverá a formação da primeira auto imagem. L_π é definido a seguir na Equação (2.10)

$$L_\pi = \left(\frac{4n_{MMF}D_{MMF}^2}{3\lambda_0} \right), \quad (2.10)$$

em que n_{MMF} e D_{MMF} correspondem respectivamente ao índice de refração e ao diâmetro do núcleo. λ_0 é o comprimento de onda do pulso luminoso. Quando a MMF é submetida a uma ação física, a auto imagem é deslocada, e dessa forma, a ação gera diferentes resultados que refletirão na intensidade transmitida.

Ao causar uma perturbação mecânica na fibra, os modos sofrem atrasos diferentes entre si. A luz que viaja na MMF é modulada por meio dessa ação física, desta forma, se os modos da MMF estiverem em fase, quando combinados sofrerão interferência construtiva, incrementando a intensidade da luz. Do contrário, se estiverem defasados ao serem recombinados no detector, ocorrerá interferência destrutiva, e o sinal de luz na saída da fibra é de baixa intensidade.

2.2 Sensores ópticos

Partindo de uma descrição geral, o termo sensor é usualmente empregado para designar um dispositivo capaz de sentir alguma forma de energia, seja ela, térmica, cinética ou luminosa, as quais podem se relacionar com algumas grandezas físicas, como por exemplo, velocidade, aceleração, posição, temperatura, corrente, campo magnético, etc (WENDLING, 2010).

Geralmente, os sensores ópticos se baseiam na emissão de um feixe de luz que será detectado por uma célula fotossensível, das quais podem ser, um fotodiodo, um fototransistor, etc. No geral, o sinal luminoso emitido é convertido para o domínio elétrico. O emissor e o receptor ficam justapostos no mesmo conjunto óptico.

De acordo com Nascimento (2011), algumas características inerentes são utilizadas para denominar um sensor, das quais são apresentadas a seguir:

Exatidão: mede o valor máximo de saída do sensor em comparação com o valor real.

Precisão: mede o grau de reprodutibilidade dos experimentos realizados.

Sensibilidade: é a inclinação da curva de calibração, seja ela constante ou não ao longo da gama de medição.

Histerese: quando o experimento é repetido mas o valor de saída medido sofre um desvio mesmo que o valor de excitação seja igual.

Linear: quando a relação do sinal de entrada e da saída se aproxima de uma reta ideal.

Offset: o sinal de saída é diferente de zero mesmo que o sinal de entrada seja nulo.

2.3 Sensores de fibra óptica

Os sensores desenvolvidos com fibra óptica podem ser classificados de acordo com algumas características, tais como: **grandeza medida** (mecânicos, térmicos, elétricos, magnéticos, de radiação, químicos, biológicos e médicos); **distribuição espacial da grandeza medida** (pontual, integrador, distribuído, e *quase*-distribuído); **transdução** (extrínsecos e intrínsecos); **modulação óptica** (sensores de intensidade, sensores interferométricos (ou de fase), sensores polarimétricos, e sensores de espectro) (ELIAS, 2012).

Ao comparar as fibras ópticas com os materiais e métodos já conhecidos para mensurar corrente/campo magnético pode-se destacar algumas características que podem tornar as fibras um excelente atrativo para medição de tais parâmetros, por exemplo: não condutividade, o que a torna imune a interferência eletromagnética; rápida velocidade de resposta, tendo em vista que o sinal transportado em seu interior é uma onda eletromagnética (VARGHESE et al., 2011);

possuem resistência a temperatura já que são produzidas primariamente por sílica; também possuem dimensões e peso reduzidos, e podem ser usadas em ambientes hostis.

Dessa forma, diversas técnicas de sensoriamento empregando fibras ópticas foram desenvolvidas, tais como, redes de Bragg e interferômetros a fibra óptica, bem como foram obtidos resultados experimentais e teóricos a partir de tais abordagens.

É possível encontrar na literatura uma ampla gama de sensores interferométricos a base de fibra óptica (LIU et al., 2019; LIU; LI; WANG, 2017). A aplicação da interferometria no âmbito de sensoriamento possui uma característica interessante que é o fato de possuir grande sensibilidade a pequenas variações dos parâmetros físicos se comparado aos demais tipos de sensores, alguns exemplos de sensores utilizando tal fenômeno físico são citados a seguir.

Gaglioti et al. (2014) desenvolveram um experimento fundamentado em um modelo conhecido por sensor de intrusão e localização baseado em um interferômetro de Sagnac. Diferentes condições foram testadas, como bobinas de fibra óptica com comprimentos maiores e atenuadores variáveis para simular o posicionamento das perturbações mecânicas. Seu funcionamento é baseado em dois sistemas independentes e fisicamente sobrepostos, montados na configuração de sensores interferométricos de Sagnac. O modelo conhecido explora as proporções de atenuação no anel que compõe o interferômetro de Sagnac e utiliza um anel adicional como referência para localizar a perturbação mecânica.

Um outro trabalho envolvendo interferometria foi desenvolvido pelos autores Kamenev et al. (2016), trata-se de um sismômetro baseado em MZI (*Mach-Zehnder interferometer*) de fibra óptica, o qual foi proposto e testado. O elemento sensor do sismômetro é implementado como uma bobina de fibra óptica de múltiplas voltas que permitiu obter alta capacidade de resposta para aceleração de $6,1 \cdot 10^3$ V/g na faixa de frequência de 1 a 20 Hz. É demonstrado experimentalmente que o sismômetro é capaz de detectar de forma confiável a vibração sísmica com amplitude de aceleração ao nível de $10^{-8}g$.

Foi desenvolvido um sensor para mensurar temperatura projetando interferômetro de fibra Sagnac baseado em PCF de rede quadrada. Os autores Liu, Li e Shi (2016) preencheram todos os orifícios de ar da PCF com um líquido sensível à temperatura. As características de detecção de temperatura são analisadas pelo método de elementos finitos (MEF). A birrefringência de fase, a birrefringência de grupo e a dependência de sensibilidade do comprimento de onda operável foram estudadas. A sensibilidade também foi estudada pelo espectro de transmissão, e o espaçamento de comprimento de onda entre os comprimentos de onda de ressonância a 85 °C atingiram 492 nm.

Os autores Shi et al. (2018) desenvolveram um sensor de campo magnético utilizando interferômetro de fibra Fabry – Perot de *gap* aéreo, o qual foi proposto com base no efeito magnetostriativo. O sensor é composto por SMF, lacunas de ar, fibra sem núcleo e FM. Com a presença de um campo magnético externo, o comprimento da cavidade da câmara de ar muda

devido à variação de magneto-volume do FM. Essa situação causa uma alteração na diferença do caminho óptico. A detecção do desvio do espectro de interferência leva à detecção da alteração no campo magnético. Quando o campo magnético é paralelo à direção em que o tubo capilar é colocado, a sensibilidade é de 0.2347 nm / mT, e quando é perpendicular, a sensibilidade é de 0,325 nm / mT. Também é construído um sistema prático de detecção, cuja taxa de erro relativa é inferior a 2%.

Bastos (2015) apresentou um sensor de corrente óptico utilizando um interferômetro Mach-Zehnder, construído com fibras ópticas monomodo operando a $1,55\mu$, o qual foi proposto e estudado. A detecção de corrente era obtida por perturbação mecânica aplicada a um dos braços do interferômetro. Esta perturbação produzia uma interferência óptica detectada na saída do interferômetro, que era proporcional à magnitude da corrente medida com um sensor de referência. O sensor foi testado com corrente alternada (60 Hz) variando de 115 A a 110 A. Para obter tal perturbação, a fibra era fixada em uma placa de metal vibratória, e por fim, um pequeno ímã foi posto sobre a placa de forma que o mesmo pudesse interagir com o campo produzido pela corrente que passava por um fio situado a uma determinada distância, e tinha por objetivo causar um desbalanceamento entre os sinais propagantes nos braços, de forma que ao serem recombinados estivessem defasados.

Apesar de os sensores interferométricos possuírem excelente sensibilidade ao parâmetro mensurado, estes são geralmente construídos com acopladores direcionais, os quais possuem um custo de aquisição um pouco elevado, o que pode encarecer a proposta do projeto. Outro ponto importante é que na maioria dos interferômetros, faz-se necessário um isolamento de vibrações mais crítico para que se possam obter franjas mais estáveis, qualquer perturbação do meio em um dos braços é capaz de causar uma diferença de fase entre os sinais que será notada quando os feixes forem recombinados. Também são necessários ajustes de sincronização dos braços, pois na ausência de perturbação do elemento sensor os sinais propagantes devem percorrer canais com comprimentos iguais, desta forma, os braços devem possuir mesmo tamanho (BRITO, 2006).

2.4 Metodologia de busca e seleção dos trabalhos

Uma pesquisa foi realizada nas bases científicas buscando trabalhos publicados nos últimos 5 anos que se propuseram a desenvolver sensores de medição de campo magnético e que abordavam uma metodologia parecida com a que é proposta nesta dissertação.

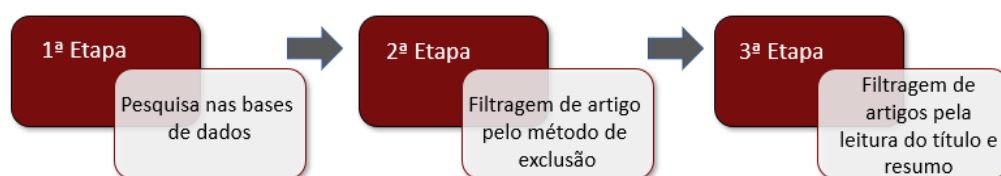
Inicialmente, foi necessário pesquisar na literatura os trabalhos correlatos e aplicar alguns critérios de inclusão e de exclusão, conforme pode ser visto na Figura 8, a fim de limitar os trabalhos a serem analisados nesta seção que diz respeito ao estado da arte.

A metodologia adotada para realizar essa revisão sistemática é baseada em cinco etapas: 1 - Escolha de palavras chaves que possam definir o assunto abordado; 2 - Definição de uma expressão lógica a ser utilizada na busca de artigos nas bases, a qual ficou definida como: “Modal”and

"Interference" and "Magnetic Field" and "Optical Sensor" e em outras bases "Interferometer" and "Magnetic Field" and "Optical Sensor"; 3 - Posteriormente foram aplicados os critérios de inclusão, tais como: ano de publicação restringida aos últimos 5 anos, tipo de artigo, título de publicação e por último o título do artigo. 4 - Em seguida realizou-se uma leitura dos resumos dos artigos que restaram após serem aplicados os critérios de inclusão. 5 - Por fim, foi analisada a técnica utilizada por cada artigo, ficando apenas aqueles que se propuseram a desenvolver um sensor de campo magnético utilizando interferometria.

Mostra-se na Figura 8 uma sequência geral de etapas que foram seguidas para a escolha dos artigos que estão detalhados e comparados na subseção seguinte.

Figura 8 – Critérios de seleção dos artigos



Fonte: Autora.

Uma relação é feita a seguir indicando a quantidade de artigos encontrados de acordo com a aplicação dos métodos de exclusão referente a cada base de dado.

1 - Base utilizada: Science Direct

Expressão lógica de busca: “Modal” and “Interference” and “Magnetic Field” and “Sensor”.

Critérios de inclusão: artigos que se propõem a desenvolver sensores de campo magnético por meio da interferometria.

Artigos encontrados: (3.777)

Critérios de exclusão:

Ano: (2015 à 2020): (1.734 artigos).

Tipo de artigo: artigo de revista e resumo de conferência (746).

Título de publicação: Sensors and Actuators A: Physical (40), Sensors and Actuators B: Chemical (26), Optics Communications (18), Optik (15) = (99 artigos).

Título de artigo e objetivos: (3 artigos), OBS: descartados por não terem o objetivo de medir campo magnético pelo método de interferometria.

Artigos que ficaram após critérios de exclusão: 3.

2 - Base utilizada: IEEE Xplore

Expressão lógica de busca: “Interferometer” and “Interference” and “Magnetic Field” and “Optical Sensor”.

Critérios de inclusão: artigos que se propõem a desenvolver sensores de campo magnético por meio da interferometria .

Artigos encontrados: (104).

Critérios de exclusão:

Ano: (2015 à 2020): (39).

Tipo de publicação: Revistas (23) e Conferências (16).

Título de artigo e objetivos: (5) OBS: descartados por não terem o objetivo de medir campo magnético pelo método de interferometria.

Artigos que ficaram após critérios de exclusão: (5).

4 - Base utilizada: Web of Science

Expressão lógica de busca: "Interferometer"and "Interference"and "Magnetic Field"and "Optical Sensor".

Critérios de inclusão: artigos que se propõem a desenvolver sensores de campo magnético por meio da interferometria.

Artigos encontrados: (26).

Critérios de exclusão: Tipo de publicação: artigo de revista (17).

Ano: (2014 à 2020) (4 artigos).

Título de artigo e objetivos: (3).

Artigos que ficaram após critérios de exclusão: (3).

Total de artigos restantes das 4 bases: (11 artigos).

Após serem aplicados os critérios de inclusão e exclusão foram selecionados 11 artigos a serem aplicados na próxima fase, os quais serão detalhados a seguir.

2.4.1 Sensores ópticos de medição de campo magnético

A seguir serão apresentados alguns trabalhos encontrados nas bases de dados que se propuseram a desenvolver sensores de campo magnético utilizando interferência modal em fibras ópticas e/ou outros métodos que apresentaram uma metodologia parecida com a que está sendo proposta nesta pesquisa.

Foi constatado que a maioria dos trabalhos relatados utilizou um arranjo que possuía três ou mais seções de fibras interligadas, das quais apresentaram uma certa complexidade na montagem dos interferômetros modais, já que necessitam de várias fusões para unir uma fibra à outra. Além do mais, com exceção de 2 trabalhos encontrados, o restante optou por utilizar fluido magnético como elemento sensor de campo magnético.

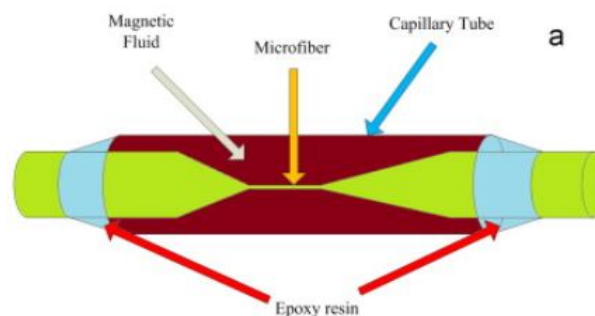
Com a aplicação do método de busca descrito, não foram encontrados sensores de corrente elétrica cuja abordagem metodológica fosse parecida com a proposta desta pesquisa, com exceção do trabalho desenvolvido por Souza et al. (2018), cujo método experimental tinha por objetivo propor um sensor interferométrico para medir corrente e campo magnético, conforme será discutido mais adiante.

Um trabalho publicado em 2015 pelos autores Ascorbe et al. (2015) demonstrou um sensor de campo sem o uso de fluidos magnéticos utilizando uma estrutura monomodo, multimodo e monomodo (SMS). A fibra óptica do SMS foi revestida com um material magneto-óptico por meio de pulverização. O processo de pulverização foi monitorado para obter a espessura ideal do revestimento e a melhor sensibilidade. O SMS foi revestido com uma liga magnética de cobalto e níquel. Os materiais que conformam a liga apresentam propriedades magneto-ópticas, e a liga também é magnetostritiva.

Na estrutura SMS, a luz transmitida através do modo fundamental da seção SMF é acoplada a vários modos na seção MMF, e quando precisa ser guiada através do segundo segmento da SMF, a luz é recuperada para o modo fundamental. Um transformador elétrico foi usado para aplicar o campo magnético à fibra óptica. Os espectros foram coletados por um analisador de espectro óptico (OSA). As maiores variações no espectro ocorreram para 1400 e 1450 nm e entre 1530 e 1590 nm ao aplicar um campo de 330 mT.

Em um outro artigo, um sensor de campo magnético foi proposto e demonstrado baseado nos efeitos de interferometria. Os autores Zheng et al. (2015) montaram um interferômetro óptico de modo de microfibra (MMFI - *microfiber mode interferometer*) combinado com fluido magnético. O MMFI foi encapsulado em tubo capilar de sílica contendo o FM, conforme mostrado na Figura 9. A MMFI foi fabricada afinando uma fibra monomodo com uma máquina de fusão (Fujikura, FSM-100P). Para unir uma fibra na outra e afinar a junção, foi necessário repetir a fusão várias vezes, submetendo o ponto de enlace a elevadas tensões. O FM utilizado era composto por nanopartículas de Fe_3O_4 .

Figura 9 – Diagrama esquemático do sensor de campo magnético proposto



Fonte: Zheng et al. (2015)

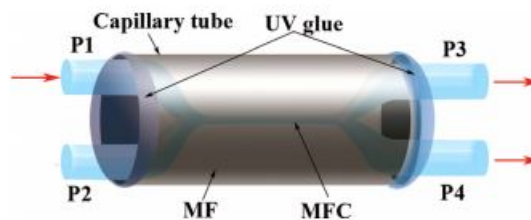
A extremidade do sensor MMFI foi conectada a um OSA, o campo magnético foi gerado por um ímã permanente com seção transversal de 100 mm x 50 mm e medido em tempo real por

um gaussímetro.

Nos experimentos foi possível notar que a intensidade do mergulho da transmissão reduzia com o aumento da força magnética produzida pelo campo. O desvio do comprimento de onda de mergulho indica que o índice de refração (IR) do FM diminui com a intensidade do campo magnético. O comprimento de onda do mergulho muda rapidamente de 1584,2 nm para 1563,7 nm, quando a força do campo magnético é aumentada de 0 e 7,1 mT. Logo em seguida, a resposta diminui, pois ocorre saturação gradual do FM em relação ao campo. Em termos da potência óptica, a sensibilidade medida é de 0,54 dB/mT. O crescimento da potência com o campo possui um comportamento logarítmico, portanto, a sensibilidade foi calculada apenas para uma escala linear que abrange uma faixa de campo de 0 a 13 mT. No entanto, os autores mediram o aumento da potência óptica para uma faixa de campo de 0 a 22 mT.

O artigo "*Highly sensitive magnetic field sensor based on microfiber coupler with magnetic fluid*" (LUO et al., 2015) apresenta um tipo de sensor de campo magnético usando um acoplador de microfibra (MFC - *microfiber coupler*) envolvido com fluido magnético, apresentado na Figura 10, o qual foi demonstrado experimentalmente. O MFC junto com o FM foram postos no interior de um tubo capilar, cujas extremidades foram vedada com um tipo de cola UV (Ultravioleta). Um sinal de entrada que incide na porta P1, ao passar pelo acoplador se divide para as duas portas de saída, P3 e P4.

Figura 10 – Esquema do MFC proposto



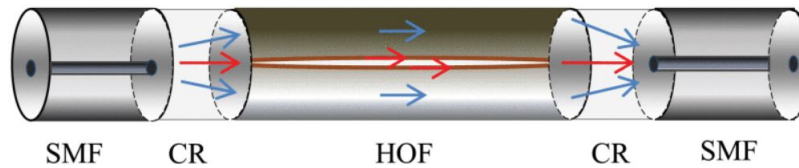
Fonte: Luo et al. (2015)

Como o MFC é fortemente sensível a variação do IR ao redor, e o IR do FM é sensível ao campo magnético, a função de detecção de campo da estrutura proposta foi demonstrada. A intensidade do campo magnético é obtida medindo o desvio do comprimento de onda de mergulho e a variação da perda de transmissão do espectro. Os resultados experimentais mostram que a sensibilidade do sensor é dependente do comprimento de onda.

No ano de 2016, um sensor compacto utilizando MZI baseado em fibra óptica oca (HOF - *hollow optical fiber*) e FM foi proposto para medir campo magnético (SHI et al., 2016). O HOF foi imprensado entre duas fibras monomodo utilizando um *splicer* de fusão (S178, FITELE), aplicando na junção várias fusões, com o intuito de formar uma estrutura (SHS), conforme mostra-se na Figura 11. As regiões colapsadas (CR - *collapsed regions*) entre HOF e SMF podem ser controladas ajustando o tempo de descarga e a intensidade durante o processo de emenda.

Quando a luz guiada no núcleo SMF é transmitida para HOF, devido à região colapsada entre o SMF e HOF, a luz difrata e se espalha para a região colapsada. No primeiro CR, o modo fundamental é dividido pelo núcleo e pelos modos de revestimento dele. Então, os modos do núcleo e os modos de revestimento interferem-se mutuamente no segundo CR, o sinal resultante é recebido pela SMF de saída. A estrutura SHS foi colocada dentro de um tubo capilar preenchida com FM.

Figura 11 – Esquema do MZI baseado em fibra óptica oca

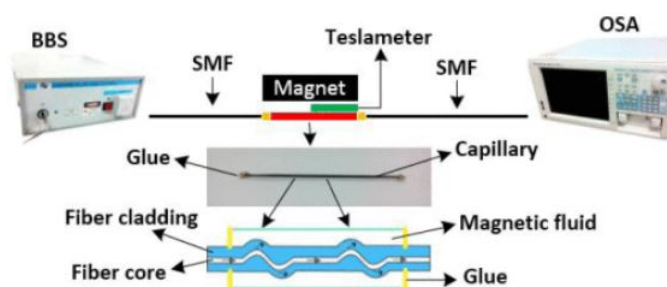


Fonte: Shi et al. (2016)

A força do campo magnético pôde ser obtida ao monitorar o deslocamento do comprimento de onda. Uma fonte de luz de banda larga (BBS, ALS-CWDM, Amonics) e um OSA (AQ6370, Yokogawa) foram empregados para monitorar o espectro de transmissão da estrutura SHS. O dispositivo sensor preparado é colocado sob um campo magnético uniforme. A força do campo magnético foi alterada pelo ajuste da corrente de alimentação.

Também em 2016, um trabalho intitulado como “*An All-Fiber Magnetic Field Sensor Based on Dual-S-Shaped Optic Fiber Integrated With Magnetic Fluid*” foi proposto pelos autores Lei et al. (2016). O sensor desenvolvido baseava-se no MZI, e possuía uma estrutura em forma de S duplo, conforme mostra-se na Figura 12. Tal estrutura foi fabricada unindo duas fibras monomodo sobrepostas com uma máquina de fusão. Os autores também colocaram a estrutura em um tubo capilar preenchido com FM. As variações produzidas por um campo magnético externo causavam alterações no índice de refração do FM. Além da medição do sinal em termos do espectro, os autores montaram um sistema de medição elétrico para aquisição dos dados em termos da tensão, mostrando que uma alteração da força magnética do campo implicava em uma variação da tensão aferida no circuito.

Figura 12 – (a) Diagrama esquemático da configuração experimental para o teste de tenabilidade do campo magnético. (b) A microestrutura preenchida com MF é selada em um capilar com cola. (c) Diagrama de estrutura do SMF dual-S-Shaped.



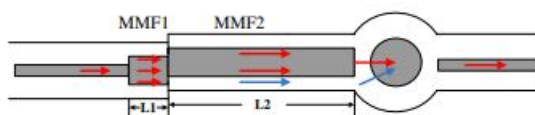
Fonte: Lei et al. (2016)

A estrutura em forma de S foi projetada para dividir uma luz incidente em duas partes (revestimento e núcleo) ou excitar modos de ordem superior. A medida que a luz emitida por uma fonte BBS se espalha na primeira junta de fibra, os modos de alta ordem são excitados. Na segunda emenda, os modos de revestimento e o modo fundamental são recombinados, e o espectro de interferência formado entre eles foi monitorado por um OSA. O sensor proposto demonstrou que pode detectar efetivamente a intensidade do campo magnético aplicado, monitorando o deslocamento do comprimento de onda do espectro de interferência.

O comprimento de onda e a intensidade dos vales de interferência mudam com o aumento da força do campo magnético. O espectro muda rapidamente para um comprimento de onda menor quando a força do campo magnético aumenta de 0 para 7,94 mT, e então, tende a ser estável quando o campo é maior que 7,94 mT. Isso ocorre porque o índice de refração do fluido magnético de Fe_3O_4 depende da direção entre o campo magnético e a propagação da luz.

Um sensor de campo magnético baseado em um interferômetro intermodal revestido por fluido magnético é proposto e demonstrado experimentalmente pelos autores Tong et al. (2017). Uma estrutura de núcleo-*offset* entre dois segmentos de MMF é formada usando um splicer de fusão a arco elétrico comercial, e então uma estrutura esférica é formada no final do segundo segmento de MMF, conforme ilustra-se na Figura 13. A seção de núcleo-*offset* é fabricada alinhando duas extremidades de fibra ao longo das direções horizontal e vertical, e, em seguida, mantendo a direção horizontal invariável e ajustando o valor de deslocamento do núcleo para a direção vertical. Quando a luz que se propaga ao longo do SMF de entrada entra na seção MMF1, os modos de núcleo de alta ordem do MMF são excitados. Quando os modos são transmitidos da MMF1 para a MMF2, eles se dividem entre os modos de revestimento e os modos do núcleo. Os modos de núcleo e revestimento irão interferir um com o outro na estrutura esférica devido a diferença do caminho óptico causada pela diferença do índice de refração entre o núcleo da fibra e o revestimento e, assim, formar um dispositivo de interferômetro Mach-Zehnder.

Figura 13 – Diagrama esquemático do sensor proposto.



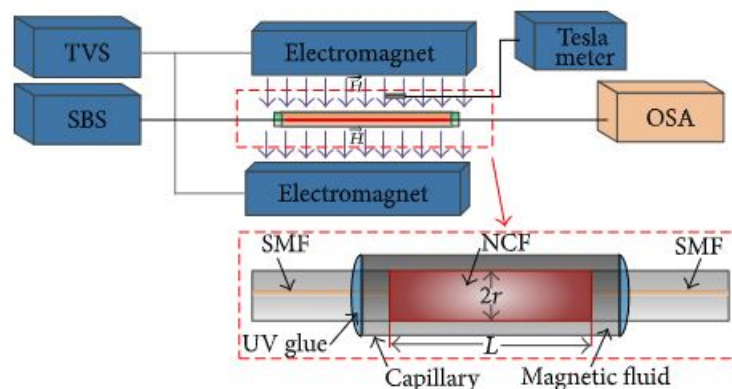
Fonte: Tong et al. (2017).

Dois vales de interferência (referidos como dip1 e dip2) do interferômetro integrado ao FM sob diferentes intensidades de campo magnético foram analisados. Foi observado o deslocamento azul do comprimento de onda com o aumento da intensidade do campo magnético. Como a intensidade do campo magnético aumentou de 0 a 24 mT, os vales de interferência foram deslocados de 1537,81 para 1533,96 nm para dip1 e de 1556,75 para 1554,33 nm para dip2.

Os autores Huang et al. (2017) propuseram um sensor de campo magnético utilizando

a estrutura SMS, baseada nos efeitos de interferência multimodal. Como elemento sensível ao campo foi utilizado o FM. A estrutura do SMS é fabricada por fusão de uma seção específica de comprimento da fibra multimodo de índice degrau entre duas seções da fibra monomodo padrão. Neste artigo, a fibra multimodo da estrutura SMS é escolhida como uma seção de NCF (*no core fiber*). A configuração esquemática da estrutura de fibra SMF-NCF-SMF (SNS) proposta é demonstrada na Figura 14. Como fonte de luz utilizou-se um SBS (*supercontinuum broadband source*), e para registrar o espectro de transmissão, um OSA foi usado.

Figura 14 – Diagrama da estrutura da fibra SNS

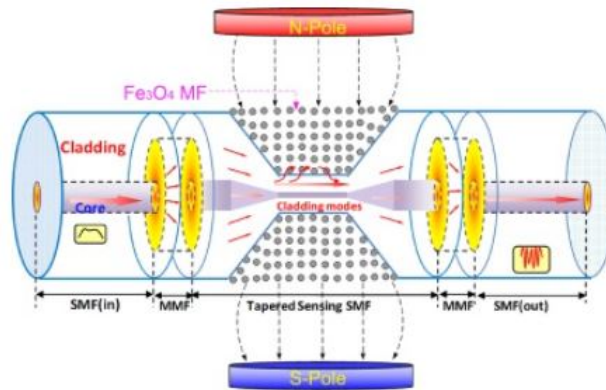


Fonte: Huang et al. (2017)

O comprimento da fibra da seção multimodo foi determinado com base no efeito de auto-imagem através de simulações. A intensidade medida em função do campo magnético externo é linearmente proporcional à força desse campo na faixa de 6,35-14,29 mT. Os autores demonstram que devido às características de variação do índice de refração e do coeficiente de absorção do fluido sob diferentes valores de campo magnético, o método se mostrou eficaz para melhorar a sensibilidade da estrutura SMS.

O trabalho intitulado "*Highly sensitive magnetic field sensor using tapered Mach-Zehnder interferometer*" apresenta os resultados de um sensor interferométrico para medição de campo sendo totalmente óptico (CHEN et al., 2018). O dispositivo compreende uma estrutura em sanduíche em linha, isto é, uma estrutura de fibra multimodo, monomodo e multimodo (MSM) que é selada dentro de um tubo contendo FM, conforme apresenta-se na Figura 15. O diâmetro da fibra monomodo é reduzido para $4,2 \mu\text{m}$, o que efetivamente melhora o acoplamento e o desacoplamento da radiação dos modos de revestimento e aumenta a sensibilidade do interferômetro em relação alteração do índice de refração do FM.

Figura 15 – Diagrama da estrutura da fibra SNS

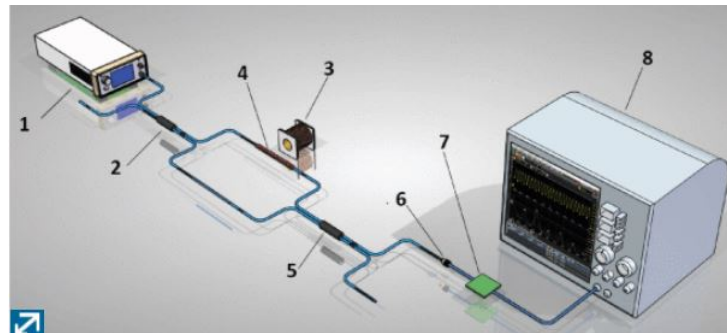


Fonte: Chen et al. (2018)

As duas seções da MMF desempenham o papel de acopladores para o acoplamento e o desacoplamento dos modos núcleo-revestimento, e a SMF do meio atua como o braço de interferência. Como a diferença de índice de refração entre os modos de revestimento e o modo central produz uma certa diferença de fase de transmissão, é alcançado um espectro de interferência bem definido. Com o aumento do campo magnético, o espectro de interferência do sensor apresenta variações nítidas, incluindo intensidade (contraste de franja) e comprimento de onda. O sensor é capaz de medir campo em uma escala que vai de 0,24 a 2 mT. Em relação ao comprimento de onda, a sensibilidade obtida foi de -2,886 nm / mT.

No mesmo ano, os autores Souza et al. (2018) propuseram também um sensor baseado nos princípios de interferometria, cujo objetivo era medir corrente elétrica e campo magnético usando dois acopladores, de forma a estruturar um interferômetro Mach-Zehnder em fibras ópticas, utilizando nanopartículas paramagnéticas como elemento sensível ao campo. Na Figura 16 é apresentada a configuração experimental do interferômetro ligado ao laser e equipamento de captação do sinal elétrico após ser convertido do domínio óptico. Foram utilizadas nanopartículas de ferrita de níquel (NiFe_2O_4) com tamanho médio de cristalito de 72 nm, os autores fizeram uma modelagem matemática aproximada para a análise do sensor. A transmissão óptica do sensor era alterada pela vibração das nanopartículas presentes em um dos braços do interferômetro. Foi possível observar aumento do sinal de saída do sensor, com variações crescentes do campo magnético. Também foi analisou-se a redução do sinal óptico na saída da fibra aumentando a distância entre o braço sensor e o elemento gerador do campo magnético.

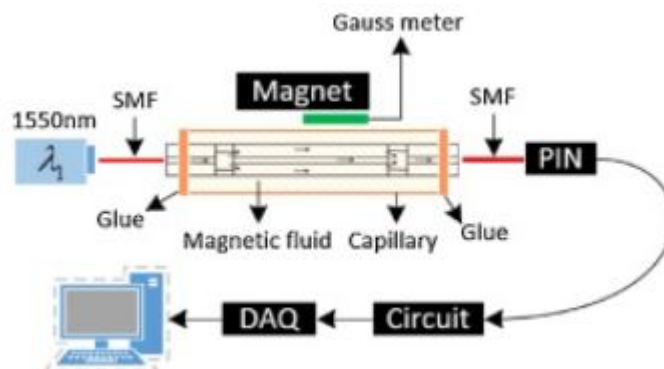
Figura 16 – Estrutura MZI e nanopartículas



Fonte: Souza et al. (2018)

Luo et al. (2018) desenvolveram um sensor de fibra óptica preenchida de FM, consistindo de uma estrutura MSM, conforme mostra-se na Figura 17, essa configuração é baseada no interferômetro Mach-Zehnder, que é fabricado pela junção de uma seção de fibra monomodo sem revestimento entre duas seções curtas de fibras multimodo utilizando um splicer de fusão. A microestrutura é selada em um tubo capilar contendo o FM, e a sonda de detecção de campo magnético é formada. Variações em um campo magnético externo são vistas como causadoras de mudanças no índice de refração do FM. Esta mudança no índice de refração com intensidades de campo magnético entre 0,6 mT e 21,4 mT produz um deslocamento na posição do pico do comprimento de onda.

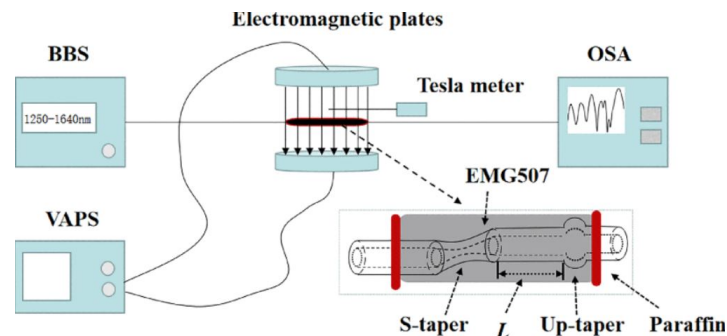
Figura 17 – Diagrama esquemático da configuração experimental para campo magnético



Fonte: Luo et al. (2018)

Wu et al. (2019) apresentaram um sensor de baixo custo para medição de campo magnético baseado nos efeitos de interferência modal. Como fonte de luz os autores utilizaram uma BBS, e como receptor, um OSA. O interferômetro em fibra possui uma estrutura em forma de S. Na Figura 18 é ilustrada a configuração do *setup* proposto pelos autores. O sensor é fabricado vedando a estrutura interferométrica diretamente em um tubo capilar, e colocado no centro de dois eletroímãs acionados por uma fonte ajustável de tensão. Como elemento sensor foi utilizado fluido magnético.

Figura 18 – Diagrama esquemático do sistema de detecção de campo magnético proposto



Fonte: Wu et al. (2019)

O experimento mostra que os resultados estão de acordo com o esperado, conforme relatado na literatura, pois, com o aumento do campo magnético observou-se uma diminuição do comprimento de onda. Para campos abaixo de 4 mT a variação do comprimento de onda muda lentamente, pois é quando o FM começa a ser magnetizado. O sensor obteve uma resposta linear para uma faixa de campo situada entre 4 mT a 16 mT.

A partir da descrição dos trabalhos relatados acima, é possível perceber que a maioria utilizou um arranjo que possuía três ou mais seções de fibras colocadas em um tubo contendo fluido magnético, não se encontrando nenhuma estrutura formada apenas por uma seção de fibra monomodo ligada a uma multimodo, usando como elemento sensor o aço carbono.

Pode-se destacar também uma certa complexidade na montagem dos interferômetros modais, já que necessitam de várias fusões para unir uma fibra a outra, sendo capaz de ocasionar várias perdas por acoplamento. Além do mais, a fibra ficará sujeita a quebras nos pontos de fusão, o que ocasionaria a interrupção da transmissão do sinal óptico. Dessa forma, conclui-se que, a investigação ora proposta neste trabalho é de fundamental relevância na verificação de uma estrutura menos complexa e mais confiável.

Na Tabela 1 são apontados os trabalhos discutidos no estado da arte, dos quais estão organizados de acordo com o ano de publicação e contendo na terceira coluna a estrutura óptica do sensor e o elemento sensor utilizado.

Tabela 1 – Estudo comparativo dos resultados da revisão bibliográfica

Autor	Ano de publicação	Estrutura e elemento sensor
ASCORBE <i>et al.</i>,	2015	SMS e liga de cobalto
ZHENG <i>et al.</i>,	2015	MMFI e FM
LUO <i>et al.</i>,	2015	MFC e FM
SHI <i>et al.</i>,	2016	SHS e FM
LEI <i>et al.</i>,	2016	MZI-S e FM
TONG <i>et al.</i>,	2017	CNMM e FM
HUANG <i>et al.</i>,	2017	SMS e FM
CHEN <i>et al.</i>,	2018	MSM e FM
SOUZA <i>et al.</i>,	2018	MZI e ferrita de níquel
LUO <i>et al.</i>,	2018	MSM e FM
WU <i>et al.</i>,	2019	MZI-S e FM

Fonte: Autora

A partir da Tabela 2, constata-se que a grande maioria dos trabalhos correlatos restringe-se ao uso do fluido magnético como elemento sensor de campo magnético, abrindo espaço para explorar novos elementos que sejam sensíveis a grandeza a ser mensurada. Diferentemente dos trabalhos abordados no estado da arte, nesta dissertação é proposta uma estrutura óptica ligando apenas uma fibra monomodo em uma fibra multimodo, sendo está segunda chamada de fibra sensora, e como elemento sensível ao campo magnético foi utilizado aço carbono, popularmente conhecido como palha de aço, cujas propriedades são excelentes ferromagnéticas.

Os resultados obtidos com a estrutura SMF-MMF mostram que não é necessário usar uma terceira seção de fibra, conforme é apontado pelos interferômetros modais típicos da literatura, para que haja a formação de um padrão de interferência, pois os modos podem ser diretamente recombinados no detector após passarem pela fibra sensora MMF.

2.5 Conclusão

Fibras ópticas, em geral, possuem grande importância no envio de dados, e excelentes vantagens quando comparadas com os cabos de transmissão que apresentam em sua composição o cobre. As características mencionadas no capítulo 1 mostram que são excelentes na aplicação de sensores.

Neste Capítulo também foi dado um enfoque para os efeitos lineares que se manifestam em fibras quando são submetidas a campos eletromagnéticos, e como esses efeitos influenciam na transmissão do pulso luminoso.

Também fez-se uma explanação sobre os trabalhos encontrados na literatura que se propuseram a desenvolver sensores a fibra óptica para as mais variadas grandezas físicas. Na Subseção 2.4.1 foram abordados os trabalhos desenvolvidos nos últimos 5 anos que traziam uma abordagem mais parecida com o objetivo dessa dissertação, que é medir corrente e campo

magnético aplicando os conceitos de interferência modal.

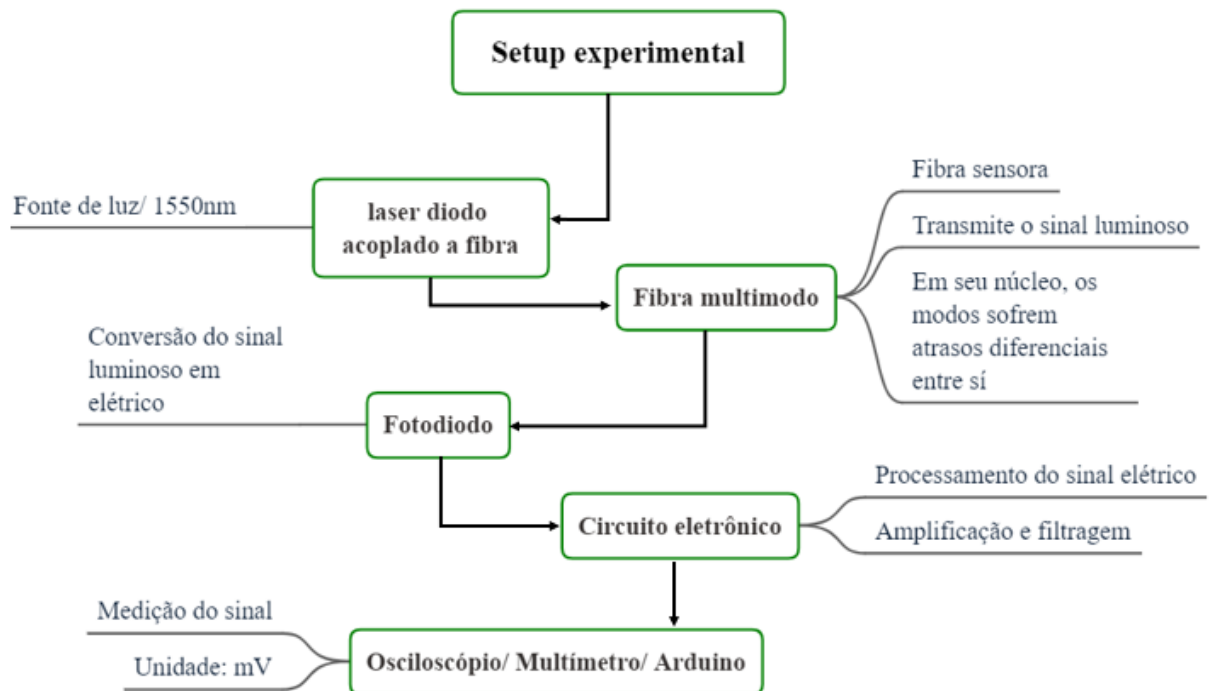
3 Metodologia

Para realizar os experimentos do sensor de corrente/campo magnético foram efetuados testes em laboratório, para que assim fosse possível coletar os dados provenientes do protótipo de bancada em situações análogas às reais. Este capítulo descreve os equipamentos e materiais usados no *setup* e os procedimentos experimentais seguidos para realizar a captura dos dados de tensão provenientes do fotodiodo quando o mesmo recebe o sinal de luz da fibra óptica.

3.1 Materiais utilizados

Na Figura 19 é representado um mapa de ideias que exemplifica os materiais utilizados na montagem do protótipo experimental, assim como, uma breve descrição destes. Nas subseções posteriores os materiais serão melhores detalhados.

Figura 19 – Mapa de ideias dos materiais usados no protótipo.



Fonte: Autora.

Todos os materiais presentes no mapa (com excessão do aço carbono e osciloscópio/multímetro) foram comprados na empresa Thorlabs.

3.1.1 Laser *butterfly*

A fonte luminosa usada no setup do protótipo é um diodo laser que possui comprimento de onda central em 1550 nm e largura de banda de 0,5 nm com pacote *butterfly* (SFL1550S) controlado por um ITC4020 da Thorlabs, possui uma fibra monomodo acoplada com conector de saída FC/APC, conforme é mostrado na Figura 20.

Figura 20 – Diodo laser acoplado a fibra e seu controlador de temperatura

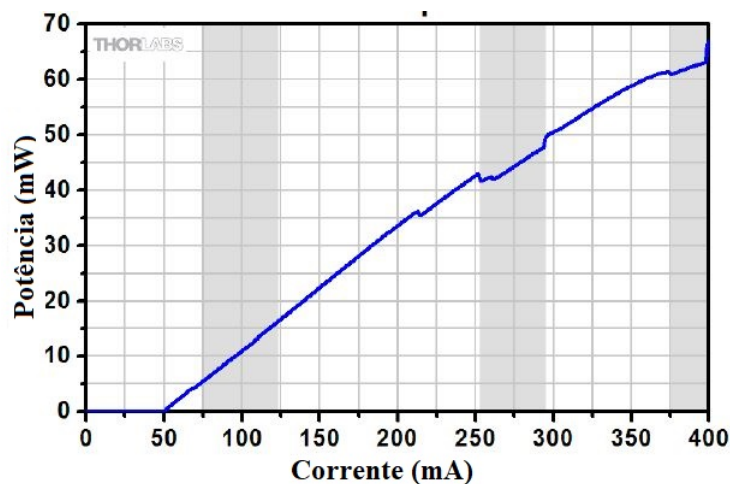


Fonte: THORLABS (2010)

O ITC4020 é capaz de controlar a tensão, a corrente e até mesmo a temperatura do laser *butterfly*, já o SFL1550S possui uma característica que merece ser destacada, a qual é chamada de corrente de *threshol*d que equivale a 50 mA. Operando abaixo dessa corrente, o laser possui um comportamento ao de um LED, ou seja, no regime de emissão espontânea. Por outro lado, acima da corrente de *threshol*d, o laser opera no modo de emissão estimulada e a potência de saída aumenta com a corrente em uma taxa maior, conforme sugere a Figura 21.

As zonas em cinza delimitam intervalo de corrente para o qual a operação do laser é multimodo, e as brancas implicam no funcionamento do laser em operação monomodo. No laser *butterfly* é possível modificar o valor da corrente, e consequentemente alterar a potência de saída. Baseando-se no gráfico da Figura 21, identifica-se o valor de potência de acordo com a corrente configurada.

Figura 21 – Regiões de operação do laser *butterfly*



Fonte: THORLABS (2010)

3.1.2 Fibra óptica multimodo

De acordo com Agrawal (2014), as fibras ópticas possuem uma estrutura cilíndrica com um núcleo de sílica envolto por uma casca que possui um índice de refração menor. No setup apresentado neste trabalho utilizou-se a fibra multimodo, que permite a transmissão de vários modos de propagação.

A fibra utilizada opera em uma faixa de comprimento de onda que vai de 400 nm até 2200 nm, possui um núcleo com diâmetro de 400 μm e baixo teor de hidroxila.

3.1.3 Fotodiodo

De acordo com Boylestad e Nashelsky (2004), os fotodiodos são dispositivo semicondutores de junção p-n, cuja aplicação de luz na junção provoca transferência de energia das ondas de luz incidente para a estrutura atômica, aumentando com isso o número de portadores minoritários. De uma forma mais geral, o fotodiodo é responsável por converter um sinal luminoso em um sinal elétrico. Na Figura 22 está representada uma imagem do fotodiodo utilizado no setup apresentado neste trabalho.

Figura 22 – Fotodiodo de Germânio



Fonte: THORLABS (2006)

3.1.4 Osciloscópio

O osciloscópio permite visualizar um sinal de tensão e sua variação no domínio do tempo em um gráfico bidimensional. O modelo utilizado neste trabalho possui a função FFT (*Fast Fourier Transform*), que permitia plotar na tela o sinal também no domínio da frequência.

3.1.5 Multímetro

Aparelho utilizado para medir algumas grandezas elétricas, tais como: corrente, tensão, resistência e etc. Nos experimentos deste trabalho, o multímetro foi utilizado para medir o parâmetro tensão elétrica e sua variação.

3.1.6 Teslameter

O teslameter é um medidor de campo magnético, nesta pesquisa foi utilizado um teslameter da marca Phywe. A ponta de prova usada foi a axial e a escala era de 20 mT.

3.2 Especificações dos componentes do *setup*

Na Tabela 2 foram colocadas algumas características mais específicas dos materiais que compõem o *setup* experimental e o número de série (*Part number*) para identificação destes. Todos os componentes ópticos listados na Tabela 2 foram comprados na empresa Thorlabs.

Tabela 2 – Especificações dos materiais que compõem o *setup*

Componentes	<i>Part Number</i>	Especificações	Fabricante
Laser diodo	SFL1550S	1550 nm, monomodo	Thorlabs
Fibra Multimodo	FT400EMT	400 nm / 2200 nm, núcleo de 400 μm	Thorlabs
Fotodiodo	SM05PD6A	Fotodiodo de Ge, 800 nm - 1800 nm	Thorlabs
Osciloscópio	DSO9254A	2,5 GHz; 4 canais analógicos	Keysight
Teslameter	13610-93	Sensibilidade 10 microT	Phiwe
Multímetro	34401A	Precisão básica: 0,02% CC, 0,06% CA	Keysight
Arduino	UNO	ATMEGA328	-

Fonte: Autora

3.3 Montagem do protótipo

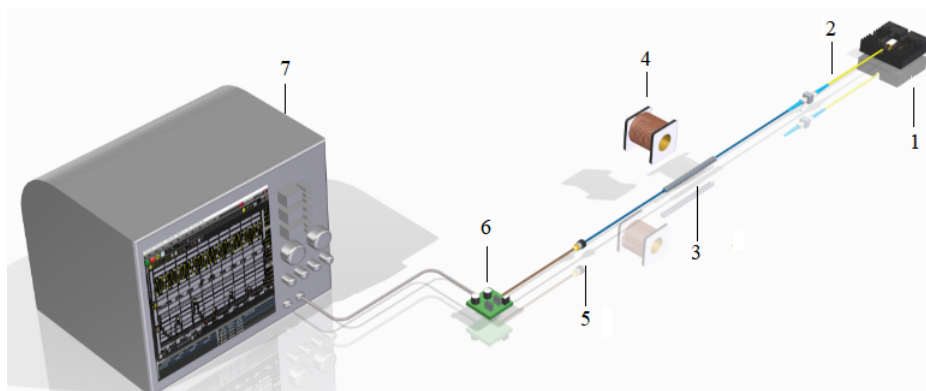
O protótipo desenvolvido neste trabalho se refere a um sensor para monitoramento de corrente e campo magnético alternados com base na teoria da interferência modal, resultado dos efeitos lineares de dispersão. Os experimentos foram desenvolvidos em bancada óptica no laboratório de Fotônica do IFCE (Instituto Federal do Ceará).

O *setup* do protótipo é mostrado na Figura 23, o qual é montado da seguinte forma: a saída da fibra monomodo acoplada ao laser butterfly é ligada na fibra multimodo utilizando-se um conector FC/PC (ADAFC2). A saída da MMF é acoplada ao fotodiodo por um adaptador FC (PM20-FC).

O fotodiodo por sua vez é conectado a um circuito eletrônico específico para realizar a amplificação e filtragem do sinal. O circuito eletrônico será melhor detalhado na subseção posterior.

A MMF é tensionada por um suporte preso a uma mesa óptica, na parte central do comprimento da fibra foi colada uma pequena quantidade de palha de aço, que possui como elemento predominante em sua composição o aço carbono. Uma distância fixa foi estabelecida entre o elemento sensor e uma bobina.

Figura 23 – Setup com fibra multimodo - Descrição: 1 – Laser butterfly; 2 – Fibra monomodo; 3 – Fibra multimodo com palha de aço ; 4 – Bobina; 5 – Fotodiodo; 6 – Circuito eletrônico; 7 – Osciloscópio/multímetro



Fonte: Autora

Um variac foi usado para alimentar a bobina e gerar um campo magnético variável para ser medido pelo sensor. A intensidade desse campo magnético foi controlada pela corrente circulante na bobina.

Em um dos fios de conexão da bobina com o variac foi ligado um alicate amperímetro para monitoramento dos valores de corrente injetados.

O campo magnético gerado pela circulação de corrente na bobina alterna de acordo com a frequência da rede elétrica, como o aço carbono é um material classificado como magnético, este é atraído pelo campo, e assim, a força magnética pode induzir uma flexão na fibra óptica, e micro ondas formadas são capazes de induzir diferenças de fase relativas entre os vários modos guiados.

O presente sensor é caracterizado também como medidor de corrente pelo fato de ser possível fazer também uma correlação do sinal de saída em função da corrente elétrica, já que o campo magnético é resultado da passagem dessa corrente pela bobina.

Um segundo suporte feito de madeira foi utilizado para tensionar a fibra multimodo, pois o que se percebia com o decorrer do experimento, e a medida que a palha de aço vibrava, era que a fibra deslizava no primeiro suporte, de modo que o comprimento desta entre os dois pontos de fixação aumentava, resultando em variações dos resultados obtidos (em termos de tensão) quando o experimento era repetido sem alteração de parâmetros físicos do *setup*. A alteração do suporte provocou uma mudança significativa e de uma forma positiva na precisão do sensor.

Por fim, o circuito eletrônico é ligado a um osciloscópio e também em um multímetro para medição e coleta dos valores de tensão elétrica.

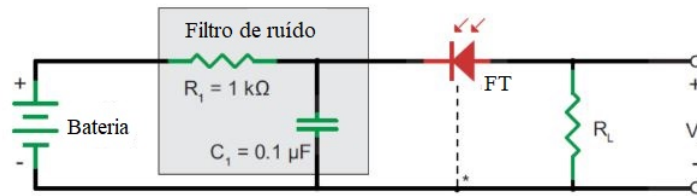
3.3.1 Circuito eletrônico para aquisição de dados

Para aquisição dos dados foi confeccionada uma placa eletrônica para realizar a conversão opto-elétrica e tratamento do sinal proveniente na saída da MMF.

Conforme já citado anteriormente na seção 3.1.3, para captação do sinal luminoso e conversão para o domínio elétrico foi utilizado um fotodiodo da Thorlabs, cujo circuito sugerido pelo *datasheet* pode ser visto na Figura 24, em que a zona demarcada em cinza é um filtro passa-baixa para reduzir ruídos induzidos pelo próprio circuito.

A corrente gerada pelo fotodiodo e que passa pelo *load resistor* (R_L) é proporcional à potência luminosa que incide no fotodiodo. Consequentemente, a diferença de potencial sobre R_L , chamada de V_L , também é proporcional à potência luminosa.

Figura 24 – Circuito do fotodiodo sugerido pelo *datasheet*



Fonte: Thorlabs, 2020

A tensão na saída do circuito do fotodiodo é definida pela equação $V_O = P.R.R_L$, em que P é a potência de incidência da luz, R_L é o resistor de carga e R é a responsividade do fotodiodo, a qual, a um dado comprimento de onda pode ser medida pela sensibilidade da luz e pode ser definida pela razão da corrente no fotodiodo pela potência de incidência da luz, conforme Equação (3.1)

$$R = \frac{I_p}{P}. \quad (3.1)$$

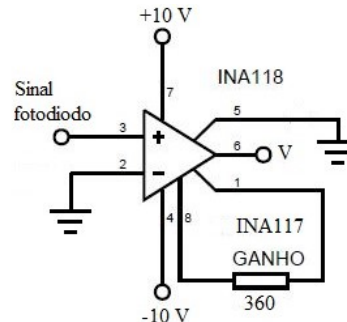
Também foi acrescentado um circuito de amplificação do sinal, pois a tensão de saída lida no fotodiodo é baixa, na faixa de 0,001 mV, desta forma a tensão V_L foi amplificada por um INA118, cujo ganho (G) é definido por apenas um resistor (R_G), conforme mostra-se na Equação 3.2. O resistor utilizado tinha um valor de 360 Ω , o que conferiu ao sinal um ganho de aproximadamente 139,88.

$$G = 1 + \left(\frac{50 \text{ k}\Omega}{R_G} \right). \quad (3.2)$$

O núcleo do circuito amplificador é mostrado na Figura 25. O INA118 é um amplificador de precisão requer uma alimentação simétrica, o circuito que fornece a fonte simétrica é ilustrado nos anexos deste documento, o qual é formado por dois reguladores de tensão LM7810 que

limitam as tensões de entrada de 25 V para 10 V. Todo o circuito é alimentado por uma fonte DC (*direct current*) externa de 25 V. O valor máximo de tensão na saída (V_o) do circuito é 10 V.

Figura 25 – Circuito INA118

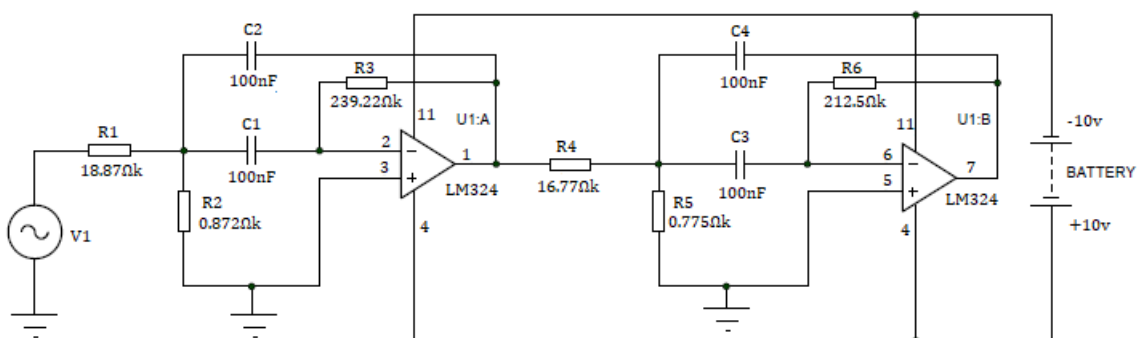


Fonte: Autora

O sinal obtido na saída da fibra, além de ser formado pelo efeito do campo magnético na palha de aço, também era composto por ruídos provenientes do circuito eletrônico de amplificação e de perturbações mecânicas advindas do meio externo, o que evidência que o sinal não era composto por uma frequência única. Dessa forma, era necessário filtrar a frequência de 120 Hz do sinal para medir a tensão de pico.

Um filtro de de quarta ordem, cujo circuito é mostrado na Figura 26 foi inserido na saída do amplificador, trata-se de um *butterworth* passa faixa, com banda de passagem situada em 110 a 130 Hz, e ganho de 20, que foi simulado no *software* Multisim e testado em uma *protoboard*. Para frequências abaixo e acima de 120 Hz o sinal de saída é atenuado, já para a frequência de 120 Hz o circuito adiciona um ganho ao sinal. Uma simulação da resposta do filtro é apresentada na seção de anexos.

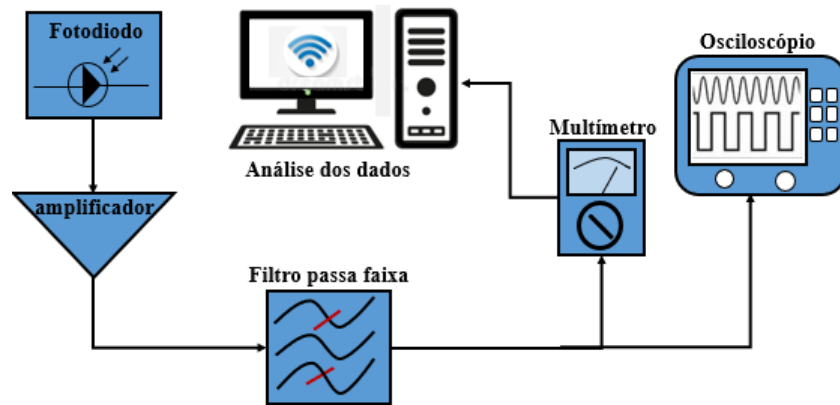
Figura 26 – Circuito do filtro analógico



Fonte: Autora

Na Figura 27 é apresentado um diagrama de blocos referente ao circuito descrito acima, cujo sinal, após ser processado (amplificado e filtrado) é medido em um multímetro, e a forma de onda é analisada em um osciloscópio.

Figura 27 – Diagrama de blocos do circuito eletrônico



Fonte: Autora

Além da aferição dos dados com o multímetro, um teste foi efetuado com o microcontrolador Arduino e seu software com o objetivo de tornar o *setup* mais compacto. Desta forma, um circuito com retificador foi montado e ligado na saída do filtro, esse circuito deixa passar apenas a parte positiva do sinal, evitando que o microcontrolador queime. Os valores de tensão foram mostrados em um *display* LCD (*liquid crystal display*) ligado no Arduino.

O circuito do Arduino e do retificador foram montados em uma protoboard, na seção de anexos foi inserida a montagem do circuito, a simulação do retificador, o código do Arduino, e o teste feito em laboratório ao medir tensão na saída do retificador.

3.4 Testes efetuados no protótipo

Primeiramente, foram realizados testes com a bobina afim de comprovar que a mesma era adequada para os experimentos em laboratório. Desta forma, foram fixadas 5 distâncias entre a bobina e o medidor de campo magnético teslameter.

Em seguida, a fibra multimodo contendo o elemento sensível ao campo foi posicionada a uma distância fixa de 2 cm em relação a bobina. Configurou-se no laser uma corrente de 125 mA, com um *power meter* mediu-se a potência na saída da fibra, correspondendo a 1,122 mW. Em seguida, injetou-se corrente na bobina, variando-a posteriormente.

Ao ser atraída pelo campo gerado pela corrente, a palha de aço produzia flexões alternadas na fibra capaz de modular o sinal transmitido, tendo em vista que a perturbação mecânica causa atrasos ainda maiores entre os modos que se propagam na MMF.

A corrente foi variada de 1 A a 10 A em um passo de 1 A. Como resultado, para cada valor de corrente foi obtido um valor de tensão que foi medida por um multímetro. Ao aumentar o valor de corrente, a tensão medida no fotodiodo também aumentava.

Em um osciloscópio foi possível captar o sinal de saída do *setup* no domínio do tempo e no domínio da frequência, com pico em 120 Hz, utilizando uma implementação própria da

FFT. O sinal de saída visto no osciloscópio é uma senóide conforme será visto no Capítulo de resultados.

O procedimento acima foi repetido para uma distância fixa de 4 cm entre fibra e bobina, e novamente utilizando o Arduino. Os dados coletados durante os experimentos foram plotados em gráficos utilizando o *software* Origin, uma descrição mais detalhada destes é abordada na seção de resultados.

Utilizando o suporte de madeira, dois testes foram realizados em duas diferentes regiões de operação do laser, um na região multimodo ao fixar sua corrente em 275 mA, e outro teste em uma região monomodo com corrente fixa em 425 mA.

3.5 Conclusão

O projeto fruto dessa dissertação previa a confecção de um *setup* totalmente óptico para sensoriar corrente e campo magnético alternado de cabos energizados. Como realizar testes em linhas de alta tensão era completamente inviável, viu-se a necessidade de realizar os testes em laboratório.

O presente capítulo abordou como tais experimentos foram efetuados, e qual metodologia foi utilizada na realização dos testes. Também foi relatada uma descrição detalhada dos materiais que compõem o protótipo de bancada e do circuito de aquisição e processamento de dados.

Por fim, expôs-se detalhadamente um passo a passo de como foram realizados os testes em laboratório e de que forma foram analisados os dados aferidos nos experimentos.

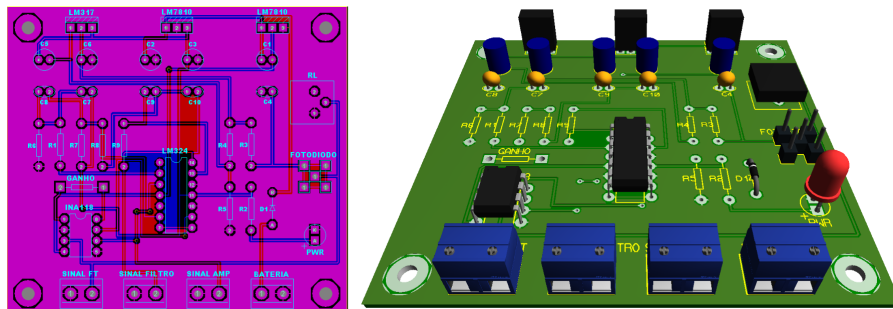
4 Resultados

Neste capítulo serão apresentados os resultados em forma de gráficos e tabelas relativos a medição de corrente/campo magnético com uma descrição e análise dos dados coletados na execução dos experimentos do protótipo de bancada. A sensibilidade do sensor proposto será calculada e comparada com outras encontradas na literatura. Também será realizada uma comparação entre os trabalhos relatados no estado da arte e o estudo em questão.

4.1 Placa eletrônica

Um compilado foi feito juntando todas as partes dos circuitos usados no processamento e tratamento do sinal elétrico, dentre eles, o circuito do fotodiodo, amplificação, filtro e retificador. Na Figura 28 mostra-se o *layout* da placa de circuito impresso (PCB - *printed circuit board*) contendo todo o circuito descrito na metodologia e uma ilustração da placa eletrônica em 3D.

Figura 28 – Circuito eletrônico e placa eletrônica em 3D contendo os circuitos do fotodiodo, amplificação, filtro passa faixa e retificador de meia onda.



Fonte: Autora.

Considera-se a placa também como resultado pelo fato de ela ser responsável por causar uma melhora significativa do sinal resposta, pois conforme será mostrado, o sinal sem o uso da placa contendo o filtro e amplificador, possuía baixos valores de tensão elétrica medidos na saída do fotodiodo e continha vários ruídos causados pelos harmônicos da própria rede.

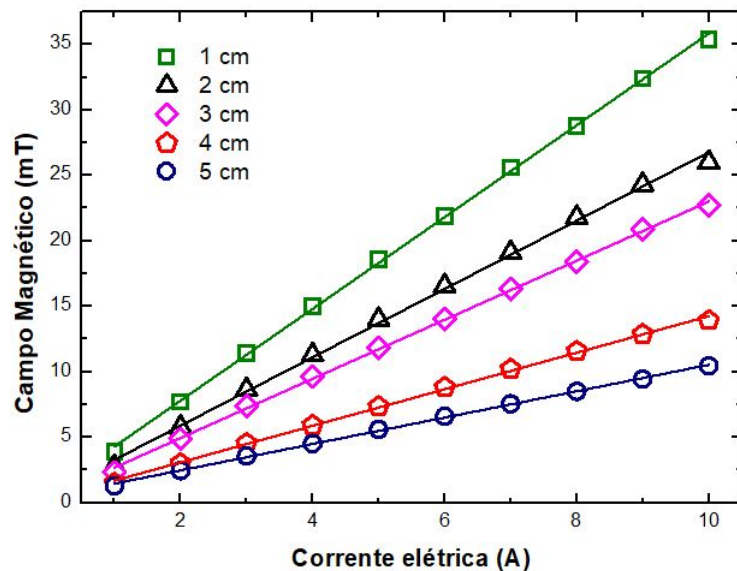
4.2 Validação da bobina

Inicialmente, foi realizada uma caracterização do campo magnético gerado pela bobina quando havia circulação de corrente. Foi possível constatar que o campo magnético é diretamente proporcional à corrente elétrica que passa na bobina, o que resultou em um gráfico linear do campo em função da corrente.

Utilizando um *teslameter*, mediu-se a intensidade do campo magnético, para que posteriormente fosse analisada e correlacionada com a resposta do sensor. A corrente elétrica injetada na bobina era uma corrente alternada (CA), cujos valores foram variados de 1 A a 10 A em intervalos de 1 A. Para cada corrente foi medido o campo nas distâncias de 1, 2, 3, 4 e 5 cm.

Os testes de caracterização da bobina estão plotados na Figura 29. Para a menor distância (1 cm), os valores de mínimo e máximo obtidos referente campo magnético foram 3,88 mT e 35,4 mT, respectivamente. Para a maior distância (5 cm), foram atingidas amplitudes de 1,28 mT e 10,46 mT referente ao mínimo e máximo.

Figura 29 – O campo magnético produzido pela bobina é diretamente proporcional à corrente aplicada nela. A medição foi realizada ao longo do eixo da bobina por um teslameter e a corrente alternada foi injetada usando um variac. As distâncias de 1, 2, 3, 4 e 5 cm são entre a bobina e a ponta de prova do teslameter e as retas no gráfico são ajustes obtidos usando o software gnuplot



Fonte: Autora.

Nota-se que o campo magnético é diretamente proporcional à corrente elétrica que passa na bobina. De acordo com a lei de Biot-Savart, o comportamento linear do campo magnético pela corrente é o esperado ao medir campo ao longo do eixo de um solenoide, isso é uma boa evidência que a bobina era adequada para a realização dos experimentos. A intensidade de campo referente a variação de corrente, e distâncias, estão listados na Tabela 3.

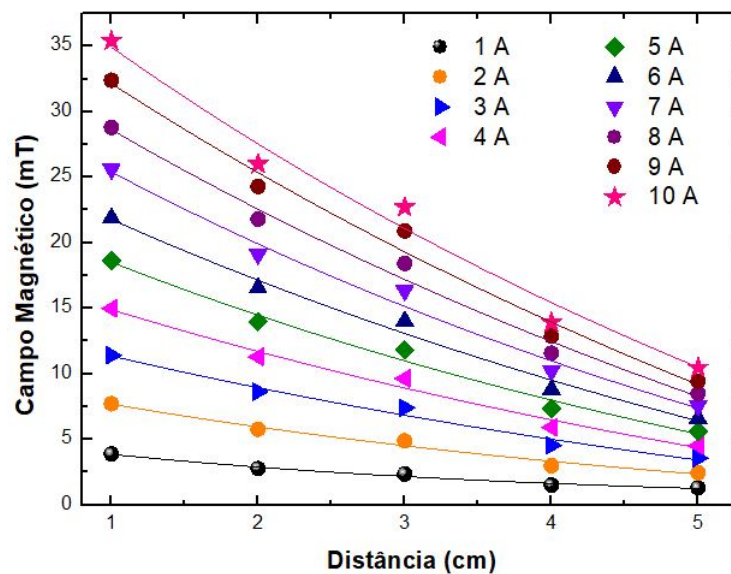
Tabela 3 – Campo magnético (mT) em função da corrente I e da distância entre o sensor e a face lateral da bobina.

Campo Magnético (mT)					
I(A)	1 cm	2 cm	3 cm	4 cm	5 cm
1,0	3,88	2,76	2,35	1,5	1,28
2,0	7,71	5,76	4,88	2,99	2,45
3,0	11,41	8,64	7,4	4,53	3,56
4,0	14,98	11,29	9,64	5,91	4,52
5,0	18,61	14,0	11,8	7,35	5,59
6,0	21,9	16,55	14,04	8,81	6,59
7,0	25,6	19,1	16,32	10,22	7,55
8,0	28,8	21,8	18,42	11,57	8,5
9,0	32,4	24,3	20,9	12,87	9,44
10,0	35,4	26,0	22,7	13,91	10,46

Fonte: Autora

Uma outra forma de visualizar os dados da Tabela 3 é fazendo o gráfico do campo magnético em função da distância da bobina para os dez valores de corrente. Nesse caso, pode-se utilizar uma função exponencial para ajustar o decaimento do campo com a distância, conforme mostra-se na Figura 30. É possível notar que o campo magnético diminui de 35,4 mT para 10,46 mT ao fixar a corrente em 10 A, o que fornece uma grande variação para caracterizar a resposta do sensor.

Figura 30 – Decaimento do campo em razão do aumento da distância. Os pontos são valores experimentais e as linhas são resultado do ajuste de uma função do tipo $a.exp(-bx)$



Fonte: Autora.

4.2.1 Experimentos utilizando o sensor com fibra multimodo

Após a caracterização da fonte (bobina) de campo magnético, foram realizadas as medições com o sensor de fibra apresentado na Seção 3.3 da metodologia.

O sinal era medido na saída do amplificador, implicando no aparecimento de vários harmônicos no domínio da frequência. Observa-se na Figura 31 que o sinal no tempo é bastante ruidoso. Após inserir o filtro passa faixa (Figura 32), foi possível obter uma senóide bem definida e livre de harmônicos.

O campo magnético que é gerado pela corrente elétrica, alterna em uma frequência de 60 Hz. Entretanto a fibra óptica multimodo contendo o elemento sensor é sempre atraída pelo campo magnético, resultando em um sinal de saída que possui o dobro da frequência da rede elétrica, ou seja, 120 Hz.

Em seguida, foram realizados os experimentos com o protótipo de bancada montado. Os resultados mostrados e discutidos a seguir foram obtidos com o sensor óptico de fibra.

Ilustra-se na Figura 31 o sinal resposta do sensor em termos da tensão lida no fotodiodo ao ligar a saída do circuito de aquisição de dados no osciloscópio, é possível ver o sinal no domínio do tempo (em cima) e a amplitude da frequência (em baixo). Neste experimento, o circuito do filtro ainda não havia sido idealizado, portanto, o sinal era medido na saída do amplificador, implicando no aparecimento de vários harmônicos no domínio da frequência. Observa-se também que o sinal no tempo é bastante ruidoso.

Figura 31 – Sinal visto no osciloscópio sem o uso do circuito eletrônico. A vista superior contém o sinal em termos da tensão em função do tempo e na parte inferior é apresentada a potência no domínio da frequência, cujo sinal possui vários harmônicos



Fonte: Autora.

Após inserir o filtro passa faixa, realizou-se novamente um novo experimento com a

montagem do sensor óptico. Na Figura 32 é mostrado o sinal medido na saída do filtro, e pode-se perceber que no domínio do tempo foi possível obter uma senóide bem definida e livre de harmônicos. O tempo entre os picos da senóide apresentada é de 8,33 ms, o que corresponde a uma frequência de 120 Hz. Ilustra-se o momento exato em que uma corrente de 5 A circulava pela bobina ao fixá-la em uma distância de 2 cm em relação a fibra sensora.

Figura 32 – Sinal visto no osciloscópio ao usar o circuito eletrônico contendo o filtro passa faixa, cuja resultante no domínio da frequência é de 120 Hz.



Fonte: Autora.

O comportamento oscilante da corrente elétrica gera uma forma de onda senoidal, e consequentemente, o campo magnético varia de igual modo, fazendo com que o sinal medido no osciloscópio apresente o comportamento que é exposto na Figura 32, gerando uma modulação senoidal no sinal óptico.

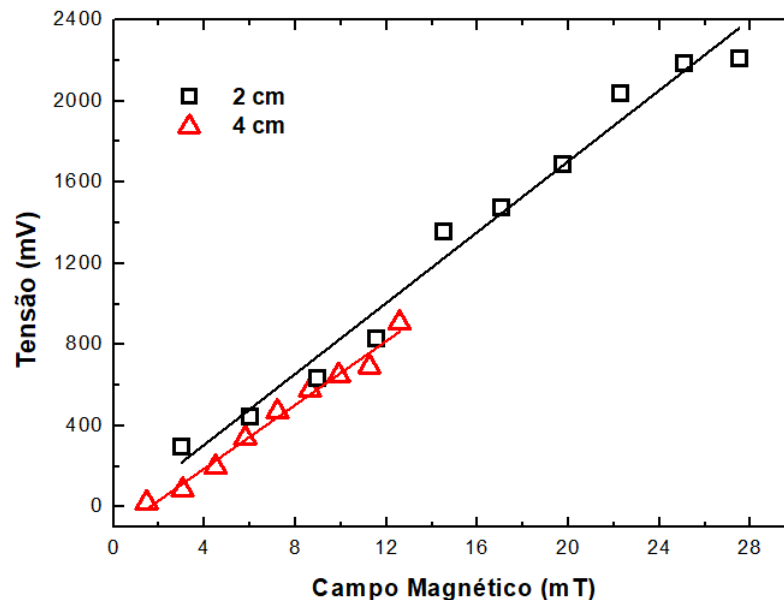
4.3 Resultados experimentais usando o sensor

Utilizando uma função específica do multímetro, foi possível obter os valores de tensão máxima em razão do crescimento do campo, cujos valores estão plotados nos gráficos das Figuras 33 e 34. Na Figura 33, relaciona-se a tensão de pico medida em função do campo magnético. É realizada uma comparação entre as distâncias de 2 cm e 4 cm entre a fibra sensora e a bobina. A faixa de medição do campo magnético vai de 3 mT a 27,5 mT para 2 cm e de 1,46 mT a 12,57 mT para 4 cm.

Uma linearidade razoável foi obtida ao comparar os dados experimentais com a linha de tendência na Figura 33, fornecendo ao sensor coeficientes de determinação em torno de 97,74% e 98,297% para as respectivas distâncias. O sensor apresentou uma variação máxima de tensão

no fotodiodo de 1914,42 mV, considerando o menor (3 mT) e o maior valor de campo (27,5 mT) referente a distância de 2 cm. Para 4 cm, a variação máxima de tensão obtida é 886,69 mV.

Figura 33 – Resposta do sensor em relação à tensão no fotodiodo em função do campo magnético. As linhas de tendência fornecem coeficientes de determinação (R^2) de 0,97 e 0,98 respectivamente para as distâncias de 2 cm e 4 cm.



Fonte: Autora.

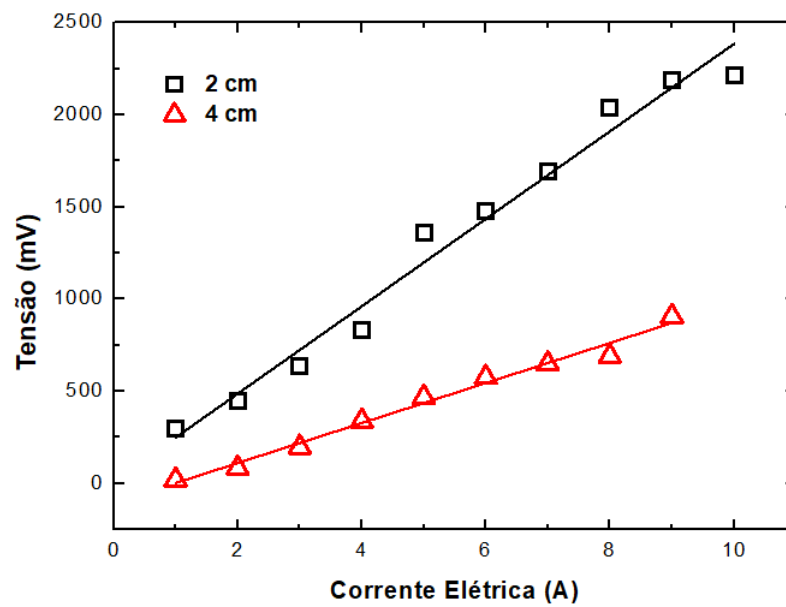
A sensibilidade é um parâmetro importante do desempenho do sensor. Alta sensibilidade é geralmente preferível em aplicações práticas, desta forma, considerando os dados da Figura 33, a sensibilidade de medição correspondente do campo magnético alcançada é de 78,13 mV/mT e 79,80 mV/mT, respectivamente, cujos valores são relativamente mais altos ao comparar com aqueles relatados na literatura, como por exemplo, o sensor de campo proposto por Lei et al. (2016) que utilizou um interferômetro Mach – Zehnder em uma estrutura em forma de S duplo obteve uma sensibilidade em termos da tensão de 0,01 mV/mT. Já a sensibilidade obtida na estrutura Mach – Zehnder com fluido magnético integrado na fibra proposta por Luo et al. (2018) era 21,83 mV/mT.

A combinação dos resultados apresentados na Figura 33 indica uma correlação direta entre a magnitude do campo magnético aplicado ao elemento sensor e a tensão no fotodiodo que por sua vez é proporcional a potência luminosa na saída do sensor. Quando o campo magnético aumenta, consequentemente a tensão se eleva proporcionalmente.

Na Figura 34 é apresentada a relação entre a tensão de pico medida no circuito do fotodiodo pela corrente elétrica injetada na bobina. É possível observar uma boa linearidade para uma faixa de corrente situada entre 1 A e 9 A. A tensão no fotodiodo é maior para a distância de 2 cm do que para 4 cm. Em geral, a tensão diminui ao aumentar a distância entre a fibra e o elemento sensor presente nela, desta forma, para valores menores de corrente, obtém-se menor

valor de tensão em função do aumento da distância. Essa variação na tensão também pode ser descrita por uma função do tipo $y = a + b.x$ (linha de tendência).

Figura 34 – Resposta do sensor óptico em relação a tensão no fotodiodo em função da corrente elétrica ao fixar as distâncias de 2 cm e 4 cm entre fibra e bobina. Os coeficientes de determinação extraídos da linha de tendência equivalem respectivamente a 0,97 e 0,98.



Fonte: Autora.

Comparando com o trabalho proposto por Souza et al. (2018), que obteve uma resposta linear da variação de tensão para uma faixa de corrente que varia de 1 A a 5 A, na Figura 34 pode-se notar que o sensor apresentado no trabalho em questão permitiu medir valores de tensão para uma faixa de corrente que corresponde ao dobro da apresentada por Souza, além de mostrar no osciloscópio um sinal livre de ruídos, evitando que harmônicos pudessem alterar o sinal resposta. O gráfico da função senoidal (mostrado na Figura 32) obtida em razão do tempo é bem definida e livre de harmônicos.

Em termos da tensão elétrica, a sensibilidade obtida por Souza et al. (2018) equivale a 704,47 mV/mT, um valor bastante elevado se compararmos com a sensibilidade obtida a partir da Figura 33, no entanto a faixa de detecção do campo magnético correspondente do sensor proposto por Souza é de 0,74 mT a 2,14 mT, enquanto que neste trabalho foi possível medir campo em uma faixa de 3,0 mT a 27,5 mT conforme mostrado na Tabela 4. Souza et al. (2018) também concluiu que o sensor é mais sensível a campos magnéticos com menores intensidades, especificamente para campos abaixo de 0,75 mT.

Na Tabela 4 estão expostos os valores de tensão elétrica medidos no fotodiodo em função da variação de campo magnético e da corrente, referente aos dados plotados nas Figuras 33 e 34. Destaca-se que houve uma saturação da tensão elétrica a ser medida, com relação ao último valor de campo magnético/ corrente, referente a distância e 4 cm, indicando que ao aumentar

a corrente e consequentemente o campo, a amplitude da tensão não crescia além do valor de 906,65 mV medido para 9 A (12,57 mT).

Tabela 4 – Tensão em função da variação de campo magnético e corrente referente as distâncias de 2 cm e 4 cm entre fibra e bobina.

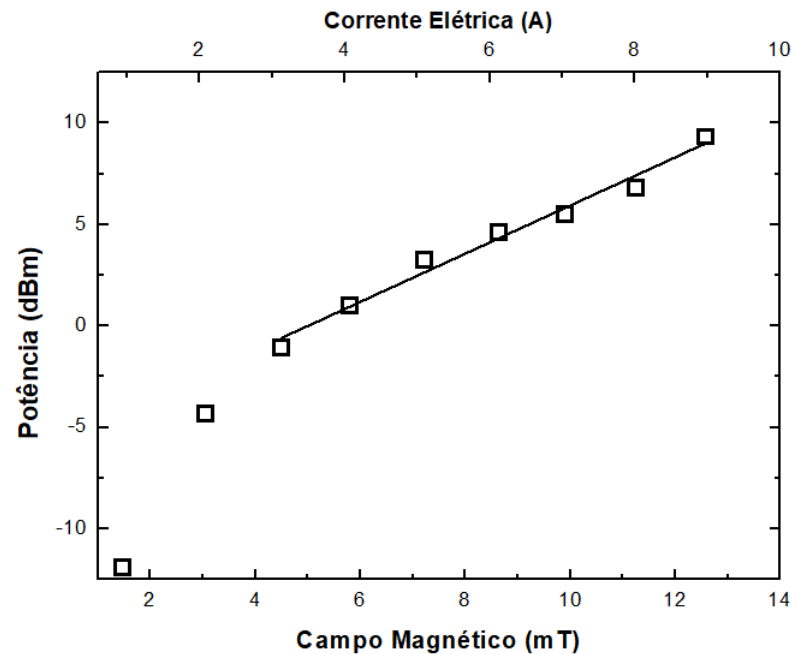
I (A)	H (mT): 2 cm	V (mV)	H (mT): 4 cm	V (mV)
1,0	3,0	298,96	1,46	19,96
2,0	6,0	444,36	3,04	83,45
3,0	8,94	635,51	4,49	196,60
4,0	11,64	831,55	5,80	338,85
5,0	14,48	1357,5	7,21	468,51
6,0	17,04	1474,74	8,64	575,44
7,0	19,76	1691,68	9,90	649,36
8,0	22,30	2036,04	11,25	690,70
9,0	25,10	2187,78	12,57	906,65
10,0	27,50	2213,38	13,89	saturação

Fonte: Autora.

Além da medição do sinal em termos da tensão, os valores de potência também foram medidos no osciloscópio, que possui uma implementação própria da Transformada de Fourier Discreta (DFT - *discrete fourier transform*).

Na Figura 35, relaciona-se a variação de potência óptica referente a amplitude da frequência de modulação do sinal em função da corrente elétrica e do campo magnético para a distância fixa em 4 cm. Os pontos são dados experimentais e as linhas são o ajuste de uma função linear do tipo $a+bx$. Quando a intensidade do campo magnético excede 4,49 mT (3A), os pontos experimentais apresentam um crescimento mais linear. A curva total não é uma reta porque a potência é uma função $\log(V)$, onde V é a tensão na saída. Como a tensão é linear, a potência não é. O ajuste linear da função indica que a sensibilidade do sensor com relação a potência e R^2 correspondem a 1,28 dB/mT e 0,97, respectivamente.

Figura 35 – Variação de potência óptica em função da corrente e do campo medido na bobina. Apesar de os pontos experimentais apresentarem um comportamento logarítmico, a linha de tendência plotada é uma reta que abrange uma escala linear de 4,49 mT a 12,57 mT. Coeficiente de determinação (R^2) igual a 0,97.



Fonte: Autora.

Na Tabela 5 estão listados os valores medidos de potência em função do campo magnético para uma distância fixa de 4 cm entre fibra e bobina. Quanto à variação do sinal de saída do sensor, foram observadas variações de aproximadamente 21,22 dB com o aumento do campo magnético.

Tabela 5 – Potência em função do campo magnético com distância fixa de 4 cm entre a fibra e a bobina.

I (A)	H (mT)	Potência (dBm)
1 A	1,46	-11,893
2 A	3,04	-4,325
3 A	4,49	-1,036
4 A	5,80	1,026
5 A	7,21	3,253
6 A	8,64	4,622
7 A	9,90	5,496
8 A	11,25	6,816
9 A	12,57	9,331

Fonte: Autora.

4.3.1 Estudo comparativo do sensor com relação ao estado da arte

Afim de avaliar a sensibilidade do sensor proposto, nesta seção é apresentada uma relação de comparação entre o protótipo de medição de corrente/campo magnético utilizando a estrutura

SM-MM e os demais trabalhos descritos no estado da arte.

Na Tabela 6 é apresentado um estudo comparativo contendo alguns resultados obtidos pelo desenvolvimento dos respectivos trabalhos encontrados na literatura e que foram descritos no estado da arte. A segunda coluna se refere a estrutura de cada *setup*, na terceira coluna é apontada a faixa de detecção de campo magnético e na quarta coluna apresentam-se os valores das sensibilidade obtidas por cada sensor .

Tabela 6 – Estudo comparativo dos resultados da revisão bibliográfica.

Autor	Método	Range de detecção	Sensitividade
Ascorbe et al. (2015)	SMS e liga de cobalto	apenas em 330 mT	1,45 dB / T
Zheng et al. (2015)	MMFI e FM	0 a 13 mT	0,54 dB / mT
Luo et al. (2015)	MFC e FM	0 a 40 mT	-0,37 dB/mT
Shi et al. (2016)	SHS e FM	4,76 a 9,52 mT	-2,12 dB / mT
Lei et al. (2016)	MZI - S e FM	0 a 20 mT	0,37 dB / mT
Tong et al. (2017)	MNCM e FM	0 a 20 mT	0,22 dB/mT
Huang et al. (2017)	SMS e FM	8,70 a 20,70 mT	0,97 dB/mT
Chen et al. (2018)	MSM e FM	0,24 a 2,0 mT	-8,0 dB/mT
Souza et al. (2018)	MZI e Ferrita de níquel	<0,75 mT	66,7 dB/mT
Luo et al. (2018)	MSM e FM	0,60 a 21,40 mT	0,52 dB/mT
Este trabalho (2020)	SMF-MMF	4,49 a 12,57 mT	1,28 dB/mT

Fonte: Autora.

Ao comparar a sensibilidade deste trabalho com as demais obtidas pelos outros autores citados na Tabela 6, pode-se destacar que o presente sensor apresentou uma sensibilidade que esta de acordo com a literatura em questão, apenas 3 casos apresentaram uma sensibilidade superior a deste trabalho, por exemplo, o sensor proposto por Ascorbe et al. (2015) obteve uma sensibilidade extremamente elevada ao comparar com os demais, no entanto o sensor mediu campo apenas em 330 mT. A ideia do trabalho era fazer um comparativo da variação do comprimento de onda da luz na ausência e na presença de campo magnético, buscando saber em qual comprimento de onda haveria maior variação de potência.

Os trabalhos propostos pelos autores Souza et al. (2018) e Chen et al. (2018) também obtiveram sensibilidade mais elevadas, no entanto a faixa de medição da intensidade de campo magnético é menor, o trabalho proposto por Souza et al. (2018), por exemplo, obteve excelente sensibilidade, porém, para campos abaixo de 0,75 mT. Além do mais, a estrutura proposta é formada por dois acopladores, o que pode encarecer os custos do projeto, e como se trata de um interferômetro de MZI constituído por dois braços, sendo um como referência e o outro como braço sensor, instrumentos assim necessitam de uma maior calibração, e é necessário um isolamento de vibrações mais crítico para que se possam obter franjas mais estáveis, pois qualquer perturbação do meio em um dos braços é capaz de causar uma diferença de fase entre os sinais que será notada quando os feixes forem recombinados.

Vale a pena destacar que, apesar de cada trabalho apresentado na Tabela 6 possuir uma

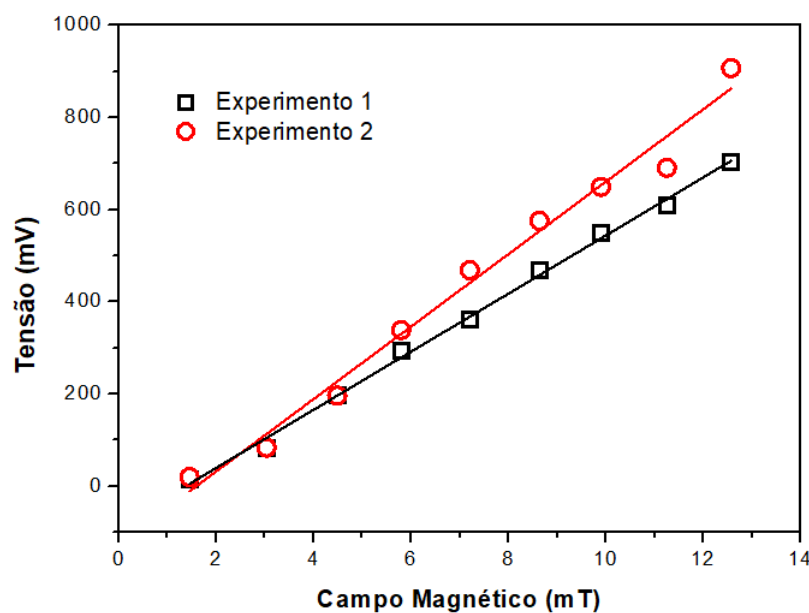
particularidade que o diferencia dos demais, como a configuração experimental dos *setups*, em 80% dos 10 trabalhos abordados, os autores optaram por utilizar o FM como elemento sensor, mostrando que seu uso não é mais uma novidade na literatura, e abrindo espaço para exploração de novos materiais magnéticos. Em comparação, além de a palha de aço apresentar interessantes propriedades magnéticas, já que sua composição principal é o aço carbono, também possui um custo bastante acessível e pode ser facilmente encontrada em supermercados, sem necessitar de um método elaborado para sua preparação.

4.3.2 Reprodutibilidade de experimentos

A fim de demonstrar a reprodutibilidade do sensor, um outro experimento foi realizado fixando-se a distância em 4 cm, buscando reproduzir as mesmas condições físicas. Na Figura 36, além de mostrar uma relação do aumento da tensão com o crescimento do campo magnético, também trata-se da reprodução do experimento. Desta forma, as curvas 1 e 2 representam a repetição de duas medidas realizadas em uma única distância, mantendo todos os demais parâmetros inalterados, com exceção da corrente elétrica injetada na bobina, a qual modificaria a intensidade de campo atuante na palha de aço.

É possível notar que a partir de 6 mT os valores começaram a apresentar uma variação de tensão entre si ao comparar a curva 1 com a curva 2. A variação máxima pode ser notada para o valor de campo magnético em 12,57 mT.

Figura 36 – Repetição do experimento com distância fixa de 4 cm para demonstrar sua reprodutibilidade. Coeficientes de determinação (R^2) 0,98 e 0,99. A partir de 6 mT os valores do experimento 1 se distanciam dos valores obtidos no experimento 2.



Fonte: Autora.

Na Tabela 7 estão dispostos os valores de tensão de cada gráfico, pode-se perceber que a

partir de 5,80 mT os valores de tensão medidos destoam cada vez mais entre si.

Desta forma, é possível dizer que o sensor em questão não possui tanta precisão, apesar de apresentar boas respostas de exatidão, as quais foram calculadas ao traçar a linha de tendência referente a cada gráfico. A exatidão fornecida de cada gráfico equivale a 98,2% e 99,6%, respectivamente.

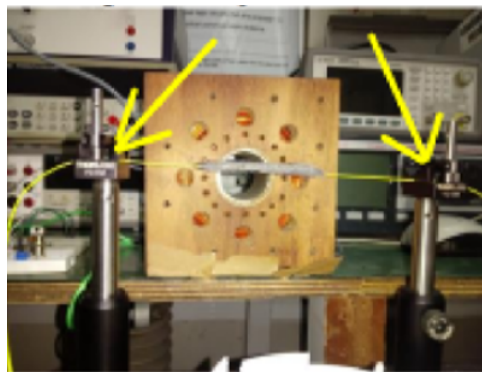
Tabela 7 – Tensão em função da variação de campo magnético e da corrente

	H (mT)	V1 (mV)	V2 (mV)
1,0 A	1,46	19,97	15,73
2,0 A	3,04	83,45	81,40
3,0 A	4,49	196,60	196,02
4,0 A	5,80	338,86	292,90
5,0 A	7,21	468,51	362,17
6,0 A	8,64	575,44	468,23
7,0 A	9,90	649,36	549,00
8,0 A	11,25	690,70	610,26
9,0 A	12,57	906,65	702,91

Fonte: Autora

As diferenças nos valores de tensão apontadas na Tabela 7 podem ser justificadas pelo deslizamento da fibra no suporte da Thorlabs mostrado na Figura 37, como mencionado na seção 3.3, a fibra sensora fixada no suporte deveria ficar completamente firme, no entanto, depois de um determinado tempo, era possível notar que ao ser atraída pelo campo magnético, a fibra sofria um deslizamento, dessa forma, o seu comprimento entre as duas hastes do suporte deixava de ser L e passava a ser $L + \Delta L$. Com uma adaptação do suporte de fixação, com intuito de evitar variações no comprimento da fibra sensora, o problema relacionado a reprodução poderia ser resolvido.

Figura 37 – Suporte da Thorlabs para fixação da fibra sensora

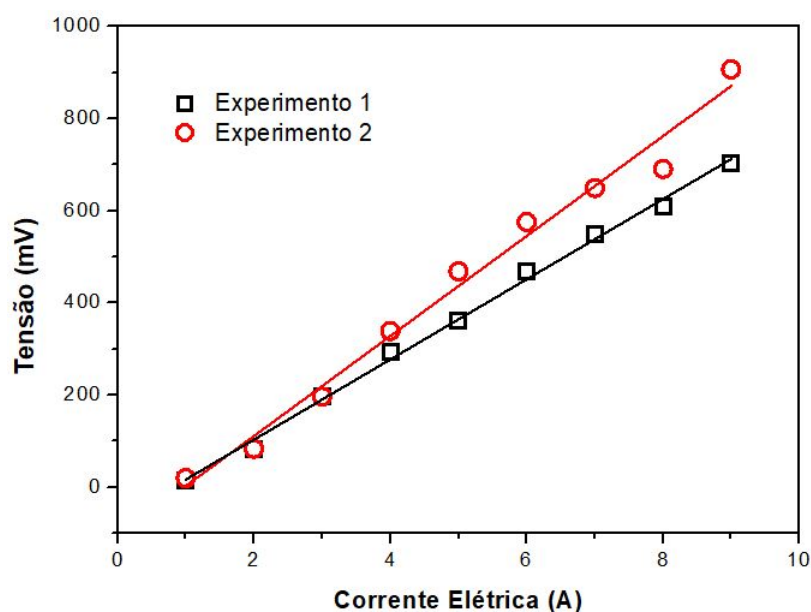


Fonte: Autora.

Como o campo magnético medido neste trabalho é produzido por uma corrente alternada, tornar-se possível fazer uma correlação da resposta do sensor em função da corrente elétrica. Na

Figura 38 é ilustrada essa correlação da resposta em termos da tensão em razão do crescimento da corrente elétrica inserida na bobina. As curvas 1 e 2 da Figura 38 são similares as curvas da Figura 36, justificando-se pelo fato de os valores de tensão serem exatamente os mesmos, já que a tensão foi medida no mesmo instante de tempo de variação do campo e da corrente, sendo este primeiro variado em função da corrente.

Figura 38 – Repetição do experimento em termos da corrente e com distância fixa em 4 cm.



Fonte: Autora.

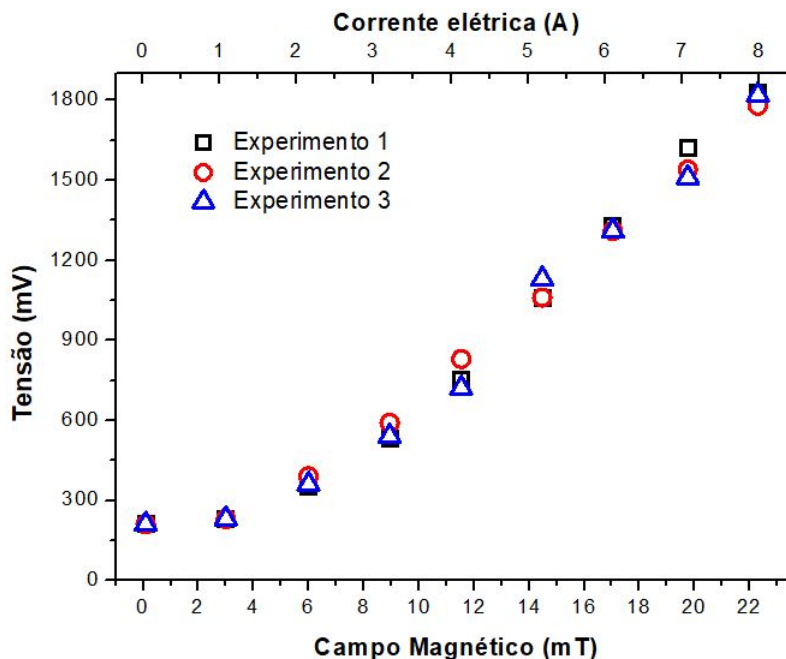
Os coeficientes de determinação apresentaram excelentes valores para ambas as curvas, em torno de 0,98 e 0,99, respectivamente, conferindo boa exatidão ao sensor também em termos da corrente elétrica.

4.3.3 Medição de tensão com Arduino

Os experimentos utilizando o osciloscópio e multímetro foram válidos na fase inicial da pesquisa, desta forma, conforme citado na metodologia, um teste foi realizado utilizando o microcontrolador Arduino, com o intuito de substituir a volumosidade do osciloscópio por um medidor mais compacto. No experimento, os valores de campo magnético foram medidos ao fixar a distância em 2 cm.

Na Figura 39 ilustra-se a variação de tensão em função do campo magnético (valores na parte inferior) e da corrente elétrica (valores na parte superior). Mostra-se na Figura o resultado de três experimentos seguidos, indicando uma reprodutibilidade razoável quando não há desmontagem das conexões. Na Tabela 8 são apresentados os valores medidos nos experimentos realizados com o microcontrolador Arduino que estão dispostos na Figura 39. Cada experimento apresentou uma variação máxima de tensão de 1.620 mV, 1.570 mV e 1.610 mV, respectivamente.

Figura 39 – Medição de tensão usando Arduino. O experimento foi repetido por 3 vezes a fim de mostrar sua reprodutibilidade.



Fonte: Autora.

Como o sinal medido na saída do filtro é simétrico, a componente negativa poderia danificar o Arduino, por esta razão um retificador de meia onda foi acrescentado ao circuito. O retificador usado é composto por um amplificador, o que conferiu um ganho no sinal de saída, por esta razão, a tensão elétrica é diferente de zero quando o campo e corrente são nulos.

Tabela 8 – Tensão elétrica em função da variação de campo magnético.

	H (mT)	V1 (mV)	V2 (mV)	V3 (mV)
0 A	0,00	210	210	210
1 A	3,00	230	230	230
2 A	6,00	350	390	360
3 A	8,94	530	590	540
4 A	11,54	750	830	720
5 A	14,48	1060	1060	1130
6 A	17,04	1330	1310	1310
7 A	19,76	1620	1540	1510
8 A	22,30	1830	1780	1820

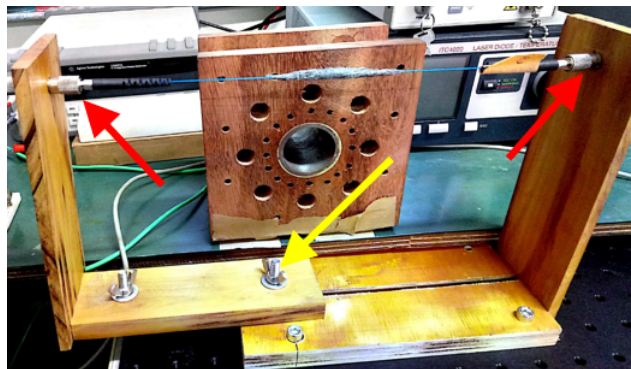
Fonte: Autora

4.3.4 Correção da reprodutibilidade do sensor e exploração das regiões monomodo e multimodo do laser

Com o objetivo de resolver o problema relacionado a reprodutibilidade do sensor, dois testes foram realizados utilizando um suporte confeccionado com madeira. No suporte da

Thorlabs a fibra era presa por pressão, e uma esponja era usada para tentar evitar danos por esmagamento. Uma desvantagem de prender a fibra óptica com tal suporte é que não havia muito controle na tensão aplicada a fibra, permitindo que a mesma folgasse com o tempo devido à oscilação, ou se a intensidade do campo magnético fosse muito forte. Para tentar solucionar esse problema foi desenvolvido um suporte de madeira, mostrado na Figura 40. Nele, a fibra é presa com conectores SMA (setas vermelhas na Figura) e um parafuso fixa a tensão aplicada a fibra (seta amarela).

Figura 40 – Suporte de madeira usado para tensionar a fibra e evitar variação de tensão elétrica quando o campo magnético estiver fixo.



Fonte: Autora.

O uso do novo suporte evitava que com o tempo e com a atração da palha de aço pelo campo magnético a fibra sensora ficasse folgada entre os pontos de fixação apontados na Figura 40, como ela agora seria rosqueada nos conectores contidos no suporte, o seu comprimento seria sempre o mesmo, permitindo que os valores de tensão medidos fossem sempre iguais ao repetir o experimento. Desta forma, só haveria variação na amplitude do sinal, se outro parâmetro fosse alterado, como por exemplo, uma outra perturbação na fibra que não fosse provocada pelo campo (corrente) seria capaz de induzir uma variação da tensão lida.

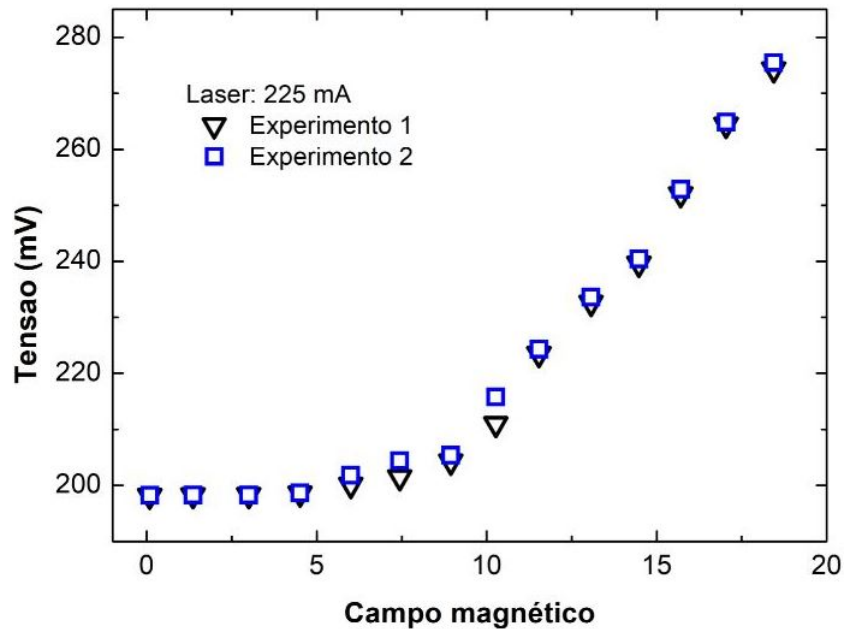
Nos experimentos realizados com o suporte de madeira, duas regiões do laser foram exploradas, a saber, uma na região multimodo com corrente configurada em 275 mA e outra na região monomodo, de corrente fixa em 425 mA. O intuito deste experimento era testar se o sinal resposta assumia um comportamento diferente ao trabalhar em distintas regiões de operações do laser, já que a fibra sensora do protótipo de bancada era uma MMF.

Nas Figuras 41 e 42 foram plotados os resultados encontrados para o laser funcionando em ambas regiões de operação, respectivamente. Uma das características mais intrigantes é a quase ausência de variação na tensão para campos magnéticos menores. Uma possível causa é o fato de que a fibra óptica estava muito tensionada, de forma que a força gerada pelo campo magnético na palha de aço não foi suficiente para causar uma perturbação que modificasse as características ópticas da fibra. A tensão elétrica não é zero devido ao ruído produzido pelo retificador usado no circuito. A faixa de variação na tensão elétrica é pequena, menos de 100 mV

para a região multimodo, o que também sugere que a fibra estava muito tensionada.

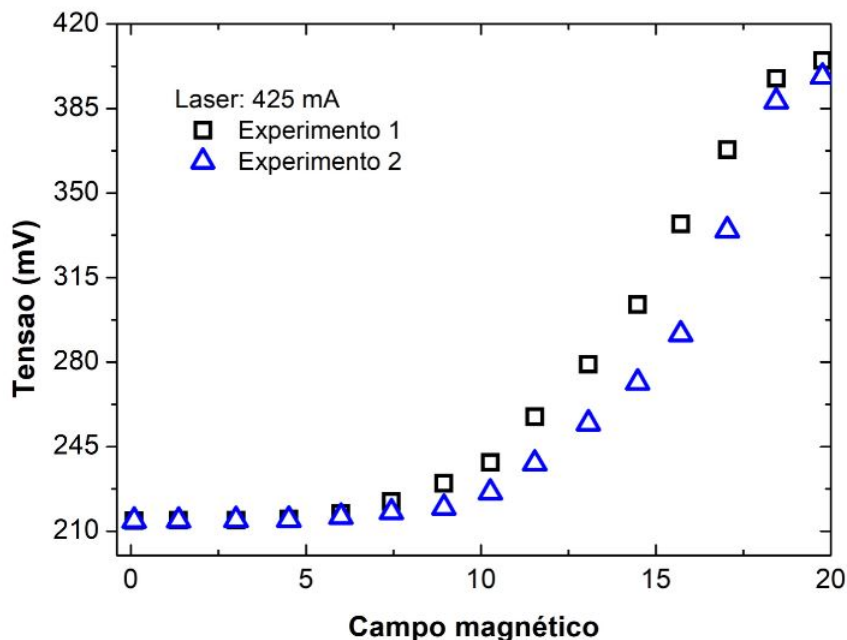
Dois experimentos foram realizados para cada corrente, sem desfazer as conexões, o que mostrou uma reprodutibilidade razoável. É possível notar que, para a região multimodo, os valores da repetição do experimento foram mais próximos do que aqueles apresentados para a repetição do experimento da região monomodo, no entanto, esta última obteve maior variação de tensão, cerca de 183 mV.

Figura 41 – Experimento realizado em região multimodo do laser, com corrente fixa em 225 mA. O experimento foi repetido com o objetivo de mostrar a reprodução do experimento usando o suporte de madeira. Nota-se no gráfico uma variação de tensão elétrica menor que 100 mV, o que pode indicar que a fibra estava muito tensionada no suporte.



Fonte: Autora.

Figura 42 – Experimento realizado em região monomodo do laser, com corrente fixa em 425 mA. Os valores experimentais apresentaram uma variação máxima de 180 mV, um pouco maior ao comparar com o experimento realizado em região multimodo, que no entanto, apresentou melhor reprodução na repetição do experimento.



Fonte: Autora.

Os resultados apresentados nas Figuras 41 e 42 estão dispostos na Tabela 9, em que H é o campo magnético na bobina, V1 e V2 são os valores da tensão aferida com multímetro e repetidas para cada região do laser.

Tabela 9 – Tensão em função da variação de campo magnético para as regiões multimodo e monomodo

H (mT)	V1 - 275 mA	V2 - 275 mA	V1 - 425 mA	V2 - 425 mA
0,09	198,17	198,25	214,39	214,31
1,36	198,26	198,26	214,47	214,41
3,00	198,29	198,30	214,50	214,55
4,51	198,56	198,67	214,95	214,72
6,00	200,12	201,80	217,37	215,94
7,44	201,46	204,39	222,28	217,87
8,94	204,26	205,36	229,85	219,72
10,27	210,98	215,77	238,46	226,00
11,54	223,48	224,34	257,32	238,01
13,07	232,60	233,60	279,13	254,62
14,48	239,59	240,43	303,81	271,52
15,71	251,99	252,84	337,17	291,47
17,04	264,40	264,89	367,96	334,57
18,44	274,30	275,48	397,50	387,92

Fonte: Autora

Apesar de serem obtidas menores variações de tensão para cada experimento, ao comparar os resultados adquiridos usando o suporte de madeira com o suporte da Thorlabs, pode-se notar que houve uma melhora significativa da reprodução dos dados experimentais obtidos pelo sensor, especialmente na região multimodo do laser.

4.4 Conclusão

Neste capítulo foi realizada uma discussão elaborada dos resultados encontrados nos experimentos, ressaltando que a tensão no fotodiodo variava em função do aumento de campo magnético produzido pela bobina. O sinal mostrado no osciloscópio demonstrou que o pulso de luz é modulado pelo comportamento oscilante do campo magnético, cuja forma de onda resultante é uma onda senoidal.

No gráfico da tensão em função do campo magnético foi possível obter uma boa linearidade ao inserir a linha de tendência, inferindo ao sensor dois valores de exatidão, 97.74% e 98.297%, referente as distância de 2 cm e 4 cm, respectivamente.

Além do gráfico de tensão por campo magnético, também foram mostrados os gráficos da variação de tensão pela corrente elétrica e da potência pelo campo.

Foram apresentados e discutidos os resultados de reprodução do experimento, os gráficos plotados da tensão em função do campo magnético demonstraram que a repetição apresentou uma diferença nos valores de tensão de uma medida pra outra indicando que o sensor não é tão preciso.

Uma segunda repetição de experimentos a fim de verificar a reprodutibilidade do sensor foi realizada utilizando um suporte diferente. O resultado mostrou uma melhora significativa na reprodução dos experimentos.

5 Considerações finais

Neste trabalho de mestrado, um sensor de corrente e campo magnético foi proposto com base no efeito de interferência multimodal. O elemento sensor aço carbono ao ser atraído pelo campo magnético gerado por uma bobina causava defasagem entre os sinais que se propagavam nos modos, e a amplitude do sinal resposta aumentava em função do crescimento do campo.

O sinal mostrado no osciloscópio demonstrou que o pulso de luz é modulado pelo comportamento oscilante do campo magnético, cuja forma de onda resultante é senoidal.

A sensibilidade do sensor foi calculada em termos da tensão para as distâncias fixas de 2 cm e 4 cm entre a fibra e a bobina, resultando em 78.13 mV/mT e 79.80 mV/mT, respectivamente, além disso foram obtidas boas linearidades da relação de tensão por campo magnético em torno de 97.74% e 98.297%.

Além do gráfico de tensão por campo magnético, também foram mostrados os gráficos da variação de tensão pela corrente elétrica e da potência pelo campo.

O gráfico da potência mostrou que a partir de 4,49 mT, os dados experimentais assumem um comportamento linear, fornecendo ao sensor uma sensibilidade de 1,28 dB/mT.

A repetição dos experimentos sem desmontagem das conexões ou variação de outros parâmetros mostrou uma reprodutibilidade razoável, no entanto, ao substituir o suporte de fixação, foi possível obter uma melhora na reprodução dos valores de tensão. Os resultados foram ainda melhores ao operar o laser em região multimodo, tendo em vista que a fibra sensora deste trabalho é uma fibra multimodo.

De acordo com sua compacidade, maior faixa de detecção de campo, sensibilidade melhorada em relação aos valores encontrados na literatura e custo reduzido, este sensor apresenta aplicações potenciais para medição de campo magnético alternado. Ainda é possível destacar que o método empregado aborda uma estrutura menos complexa em relação aquelas relatadas em outros artigos.

5.1 Trabalhos Futuros

- Realizar mais testes com o suporte de madeira, modificando a tensão aplicada a fibra óptica.
- Medir uma quantidade maior de amostras e calcular a precisão do sensor, permitindo uma comparação com os sensores de mercado.
- Implementação de IoT (*Internet of Things*) para enviar os dados aferidos em tempo real

para um servidor online.

- Além dos testes realizados em laboratório, realizar também testes em campo.
- Testar outros elementos sensores, como por exemplo, nanopartículas magnéticas.
- Medir o sinal de saída por um OSA e investigar o deslocamento do espectro em termos do comprimento de onda, já que não foram encontrados na literatura trabalhos utilizando a estrutura SMF-MMF para realizar a medição de campo em termos do comprimento de onda.

Referências

- AGRAWAL, G. P. Chapter 2 - fiber optics. In: AGRAWAL, G. P. (Ed.). **Fiber-optic Communication Systems**. New York: [s.n.], 2002. p. 29 – 92. ISBN 0-471-22114-7.
- AGRAWAL, G. P. Chapter 2 - fiber optics. In: AGRAWAL, G. P. (Ed.). **Fiber-optic Communication Systems**. New Jersey: [s.n.], 2010. p. 29 – 92. ISBN 978-0-470-50511-3.
- AGRAWAL, G. P. Chapter 2 - fibras ópticas. In: AGRAWAL, G. P. (Ed.). **Sistemas de comunicação por fibra óptica**. Rio de Janeiro: [s.n.], 2014. p. 29 – 92. ISBN 978-85-352-6425-8.
- ASCORBE, J.; CORRES, J. Magnetic field sensors based on optical fiber. In: _____. [S.l.: s.n.], 2017. v. 21, p. 269–299. ISBN 978-3-319-42624-2.
- ASCORBE, J. et al. Magnetic field sensor based on a single mode-multimode-single mode optical fiber structure. In: **2015 IEEE SENSORS**. [S.l.: s.n.], 2015. p. 1–4.
- BASTOS, A. M. **Estudo de Acopladores de Fibra óptica Tradicional e de Cristal Fotônico e Aplicações: Geração de Portas Lógicas e Sensores de Corrente Elétrica**. 139 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Teleinformática) — Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2015.
- BECHARA, R. **Análise de falhas de transformadores de potência**. 118 p. Dissertação (Escola Politécnica) — Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.
- BIRKS, T.; KNIGHT, J.; RUSSELL, P. Endlessly single-mode photonic crystal fiber. **Optical Letter**, v. 22, n. 13, p. 961–963, 1997.
- BOYLESTAD, R. L.; NASHELSKY, L. **Dispositivos Eletrônicos e Teoria de Circuitos**. 8. ed. São Paulo: Prentice Hall, 2004. ISBN 85-87918-22-8.
- BRENA, J. A.; HORCHE, P. R.; MINGUEZ, A. M. Magneto-optic current sensor with faraday mirror for linear birefringence compensation. **Optica Pura y Aplicada**, v. 45, n. 4, p. 497 – 508, 2012.
- BRITO, W. A. de. **Sistemas de Comunicação Quântica Usando Interferômetro de Sagnac e Dinâmica do Entrelaçamento dos Estados Bipartites de Qubits em Canais Ruidosos**. 118 p. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Teleinformática) — Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2006.
- CHEN, H. et al. Highly sensitive magnetic field sensor using tapered mach–zehnder interferometer. **Optics and Lasers in Engineering**, v. 107, p. 78 – 82, 2018. ISSN 0143-8166.
- CHEN, Y. et al. Optical fiber magnetic field sensor based on single-mode-multimode-single-mode structure and magnetic fluid. **Opt. Lett.**, OSA, v. 38, n. 20, p. 3999–4001, Oct 2013.
- COSTA, J. W. **Sensor de Curvatura, Vazão e Anemômetro a Fibra Óptica Baseado em Interferência Multimodal**. 2120 p. Tese (Programa de Pós-Graduação em Instrumentação e Ótica Aplicada) — Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, Rio de Janeiro, 2019.

CUNHA, J. R. F. A. da. **Modelo Teórico de Sensors ópticos Baseados em Fibras com Grade de Bragg**. 73 p. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Física) — Universidade Federal do Pará, Belém, 2007.

DAI, J. et al. Magnetic field sensor based on magnetic fluid clad etched fiber bragg grating. **Optical Fiber Technology**, v. 17, n. 3, p. 210 – 213, 2011.

DASH, J. N.; JHA, R. Pcf modal interferometer based on macrobending for refractive index sensing. **IEEE Sensors Journal**, v. 15, n. 9, p. 5291–5295, 2015.

DENG, M.; LIU, D.; LI, D. Magnetic field sensor based on asymmetric optical fiber taper and magnetic fluid. **Sensors and Actuators A: Physical**, v. 211, p. 55–59, 2014.

DUTTA, M.; STROSCIOS, M. A. **Advances in Semiconductor Lasers and Application to Optoelectronics**. [S.l.]: Singapore:Word Scientific, 2000. v. 16. ISBN 979-981-02-4257-2.

EL-KHOZONDAR H.J.; MULLER, M. E.-K. R. K. A. Magnetic field inhomogeneity induced on the magneto-optical current sensors. **Journal of Sensor Technology**, v. 2, p. 19–22, 2012. ISSN 19-22.

ELIAS, M. B. **Sistema de sensores ópticos baseados em fibra óptica de perfil-W dopada com Érbio**. 196 p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) — Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2012.

ERLEI, W. et al. High-sensitivity temperature and magnetic sensor based on magnetic fluid and liquid ethanol filled micro-structured optical fiber. **Optical Fiber Technology**, v. 55, p. 102161, 2018.

FUENTES-FUENTES, M. A. et al. Highly sensitive liquid core temperature sensor based on multimode interference effects. **Sensors**, v. 15, p. 1–5, 2015.

GAGLIOTI, S. F. et al. Aplicação do interferômetro de sagnac para detecção de perturbações mecânicas e localização. **Blucher Physics Proceedings**, v. 1, n. 2, p. 79 – 80, 2014. ISSN 2358-2359. Disponível em: <www.proceedings.blucher.com.br/article-details/11010>.

GONÇALVES, A. M. **Análise da Propagação de Impulsos em Fibras Ópticas**. 124 p. Dissertação (Instituto Superior Técnico) — Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2012.

HUANG, Y. et al. A highly sensitive intensity-modulated optical fiber magnetic field sensor based on the magnetic fluid and multimode interference. **Journal Of Sensor**, v. 2017, p. 1 – 7, 2017.

KAMENEV, O. T. et al. Fiber-optic seismometer on the basis of mach-zehnder interferometer. **Sensors and Actuators A: Physical**, v. 244, p. 133 – 137, 2016. ISSN 0924-4247. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924424716301510>>.

KEISER, G. **Comunicações por Fibras Ópticas**. 4. ed. Rio Grande do Sul: Mc Gran Hill, 2014. ISBN 0073380717.

LEI, X. et al. An all-fiber magnetic field sensor based on dual-s-shaped optic fiber integrated with magnetic fluid. **IEEE Sensors Journal**, v. 16, n. 4, p. 958–964, 2016.

LIU, Q.; LI, S.-G.; SHI, M. Fiber sagnac interferometer based on a liquid-filled photonic crystal fiber for temperature sensing. **Optics Communications**, v. 381, p. 1 – 6, 2016. ISSN 0030-4018.

- LIU, Q.; LI, S.-G.; WANG, X. Sensing characteristics of a mf-filled photonic crystal fiber sagnac interferometer for magnetic field detecting. **Sensors and Actuators B: Chemical**, v. 242, p. 949 – 955, 2017. ISSN 0925-4005.
- LIU, Z. et al. Fiber-optic current sensor based on ohmic heating of tin sphere with embedded silicon fabry-perot interferometer. **Journal of Lightwave Technology**, v. 37, n. 10, p. 2165–2171, May 2019.
- LUO, L. et al. Highly sensitive magnetic field sensor based on microfiber coupler with magnetic fluid. **Applied Physics Letters**, v. 106, p. 193507, 2015.
- LUO, Y. et al. A novel optical fiber magnetic field sensor based on mach-zehnder interferometer integrated with magnetic fluid. **Optik**, v. 174, p. 252 – 258, 2018. ISSN 0030-4026.
- MEJIA-ARANDA, A. et al. Fiber optic pressure sensor of 0–0.36 psi by multimode interference technique. **Journal of Applied Research and Technology**, v. 11, p. 695–701, 2013. ISSN 0030-4026.
- NASCIMENTO, I. M. **Interferômetros Modais em Fibra Óptica para Aplicações Sensoras**. 134 p. Dissertação (Programa de Pós Graduação em Engenharia de Telecomunicações e Redes) — Universidade da Madeira, Portugal, 2011.
- PIMENTEL JR, R. A. **Uma HistóriaDa Interferometria No Século XIX**. 260 p. Tese (Pós-graduação em História das Ciências e das Técnicas e Epistemologia) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.
- QIAN, W. et al. Temperature sensing based on ethanol-filled photonic crystal fiber modal interferometer. **IEEE Sensors Journal**, v. 12, n. 8, p. 2593–2597, 2012.
- RAJAMANI, A. S.; DIVAGAR, M.; SAI, V. Plastic fiber optic sensor for continuous liquid level monitoring. **Sensors and Actuators A: Physical**, v. 296, p. 192–199, 2019.
- RUSSEL, P. Photonic crystal fibers. **Science**, v. 299, n. 5605, p. 358–362, 2003.
- SENIOR, J. M. Chapter 3 - transmission characteristics of optical fibers. In: LIMITED, P. E. (Ed.). **Optical Fiber Communications: Principles and Practice**. England: [s.n.], 2009. ISBN : 978-0-13-032681-2.
- SHI, F. et al. All-fiber magnetic field sensor based on hollow optical fiber and magnetic fluid. **IEEE Sensors Journal**, v. 17, n. 3, p. 619–622, 2016.
- SHI, F. et al. Optical fiber f–p magnetic field sensor based on magnetostrictive effect of magnetic fluid. **Optical Fiber Technology**, v. 43, p. 35 – 40, 2018. ISSN 1068-5200.
- SILVA JR, V. M. **SENSOR DE TEMPERATURA À FIBRA ÓPTICA DE PERFIL D**. 87 p. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica) — Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2016.
- SOUZA, C. et al. Optical current and magnetic field sensor using mach-zehnder interferometer with nanoparticles. **IEEE Sensors Journal**, v. 18, p. 7998 – 8004, 2018. ISSN 0030-4026.
- SUGAWARA, D. **Sensor de absorção por campo evanescente com fibra óptica**. 98 p. Dissertação (Escola de Engenharia de São Paulo) — Universidade de São Paulo, São Carlos, 1997.

- THORLABS. **Germanium Photodiode**. 2006. Disponível em: <<https://www.thorlabs.com/thorproduct.cfm?partnumber=SM05PD6A>>. Acesso em: 09 Ago. 2019.
- THORLABS. **Benchtop Laser Diode/TEC Controller**. 2010. Disponível em: <<https://www.thorlabs.com/thorproduct.cfm?partnumber=ITC4005>>. Acesso em: 09 Ago. 2019.
- TONG, Z. et al. Optical fiber magnetic field sensor based on multi-mode fiber and core-offset structure. **Journal of Modern Optics**, v. 2017, p. 1129–1133, 2017.
- TRONCO, T. R.; ÁVILA, L. F. **Fundamentos de Comunicações ópticas**. 1. ed. [S.l.: s.n.], 2007.
- UDD, E.; SPILLMAN, W. B. **Fiber Optic Sensors: An Introduction for Engineers and Scientists**. 2. ed. [S.l.]: Wiley Telecom, 2011. ISBN 978-0-470-12684-4.
- ULRICH, R. Image formation by phase coincidences in optical waveguides. **Optics Communications**, v. 13, n. 3, p. 259 – 264, 1975. ISSN 0030-4018.
- VARGHESE, B. P. et al. A novel fiber bragg grating sensor for measuring weight. **Annual IEEE India Conference**, 2011. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/6139568>>.
- WENDLING, M. **Sensores**. 2010. Disponível em: <<https://www.feg.unesp.br/Home/PaginasPessoais/ProfMarceloWendling/4---sensores-v2.0.pdf>>. Acesso em: 14 Out. 2020.
- WU, W. et al. Compact magnetic field sensor based on a magnetic-fluid-integrated fiber interferometer. **IEEE Magnetics Letters**, v. 10, p. 1–5, 2019.
- YANG, M. et al. Optical fiber magnetic field sensors with tbdyfe magnetostrictive thin films as sensing materials. **Optics Express**, v. 17, n. 23, p. 20777–20782, 2017.
- ZHENG, Y. et al. Optical fiber magnetic field sensor based on magnetic fluid and microfiber mode interferometer. **Optics Communications**, OSA, v. 336, n. 20, p. 5–8, 2015.
- ZHOU, B. et al. Highly sensitive small pressure monitoring using hyperelastic silicone-cladding/silica-core composite optical fiber. **IEEE Photonics Journal**, v. 9, p. 1–8, 2017.
- ZU, P. et al. Temperature-insensitive magnetic field sensor based on nanoparticle magnetic fluid and photonic crystal fiber. **IEEE Photonics Journal**, v. 4, n. 2, p. 491–498, 2012.

Apêndices

APÊNDICE A – Código do Arduíno para medir tensão

Algoritmo Código do Arduíno

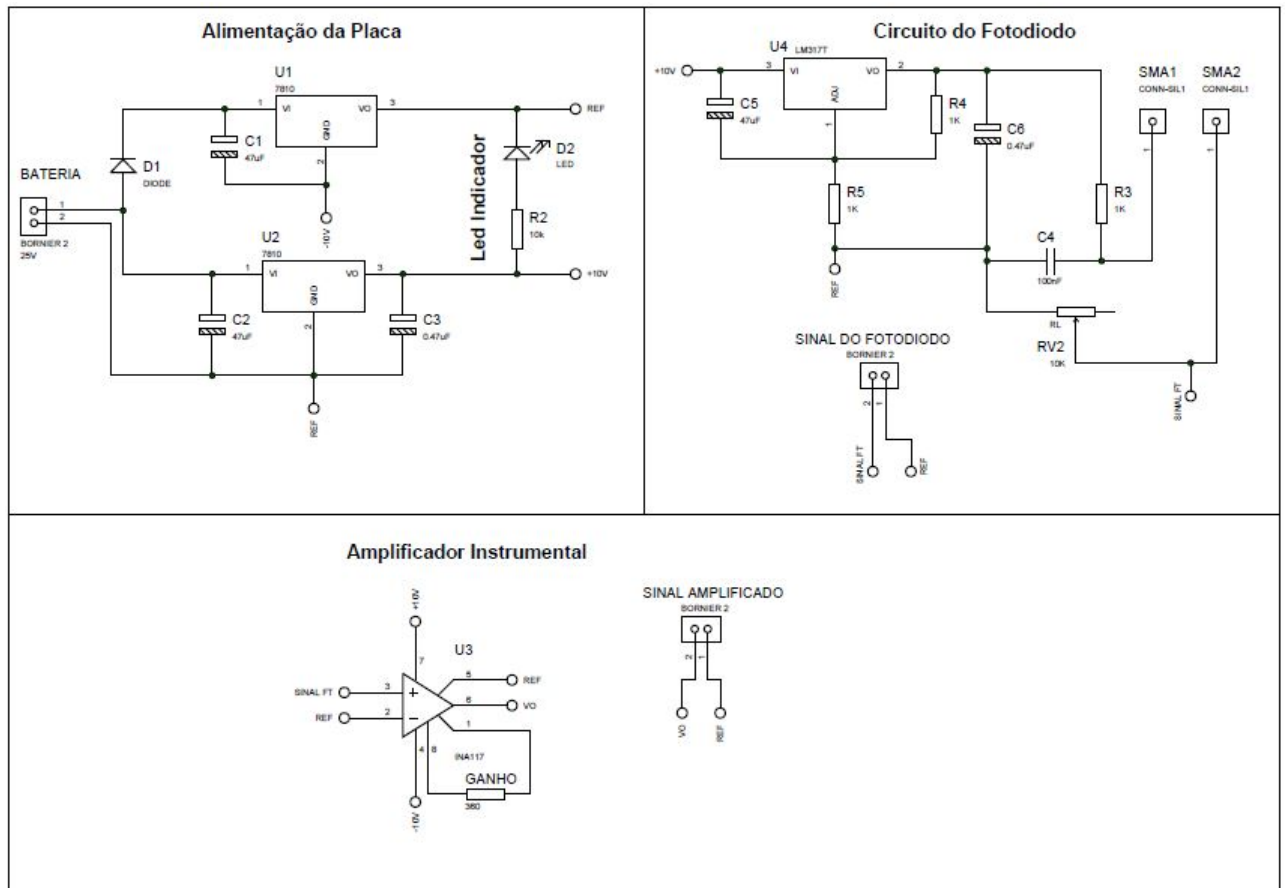
```
#include <Wire.h>;
#include <LiquidCrystal_I2C.h>;
#define pin_entrada A0;
#define TAMANHO_VETOR_VCC 220;
#define TAMANHO_MEDIA_TEMPORAL_VCC 80;
float v_cc[TAMANHO_VETOR_VCC];
float v_pico_para_media[TAMANHO_MEDIA_TEMPORAL_VCC] ;
int ultima_posicao_armazenada = - 1;
bool vetor_cheio = false;
volatile float v_maximo_global = 0;
const byte interruptPin = 2;
LiquidCrystal_I2C lcd(0x3F, 16, 2);
void setup() {
  attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(interruptPin),reset_V_pico_maximo, RISING);
  Serial.begin(9600);
  pinMode(pin_entrada, INPUT);
  lcd.setCursor(0, 0);
  lcd.print("Lab Fotonica ");
  lcd.setCursor(0, 1);
  lcd.print("Nano Sagnac ");
  delay(1000);
  lcd.clear();}
void loop() {
  for (int i = 0; i < TAMANHO_VETOR_VCC; i++){
    v_cc[i] = analogRead(pin_entrada);
    v_cc[i] = (5 * v_cc[i]) / 1024; }
  float v_pico = 0
  for (int i = 0; i < TAMANHO_VETOR_VCC; i++){
    if (v_cc[i] > v_pico) { }}
  lcd.setCursor(0, 1);
  lcd.print("Vp = ");
  lcd.setCursor(6, 1);
  lcd.print(v_pico, 4);
  Serial.print("Vp = ");
  Serial.println(v_pico);
  if (v_pico > v_maximo_global){
    v_maximo_global = v_pico;}
  lcd.setCursor(0, 0);
  lcd.print("Vmax = ");
  lcd.setCursor(7, 0);
  lcd.print(v_maximo_global, 4);
  Serial.print("Vmax = ");
  Serial.println(v_maximo_global);
  delay(400);
  void reset_V_pico_maximo(){
    v_maximo_global = 0; }
```

Anexos

ANEXO A – Circuito eletrônico

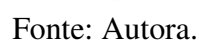
Na Figura 43 é apresentada a configuração do circuito eletrônico contendo a alimentação da placa, o circuito do fotodiodo e do amplificador.

Figura 43 – Circuito eletrônico



Fonte: Autora.

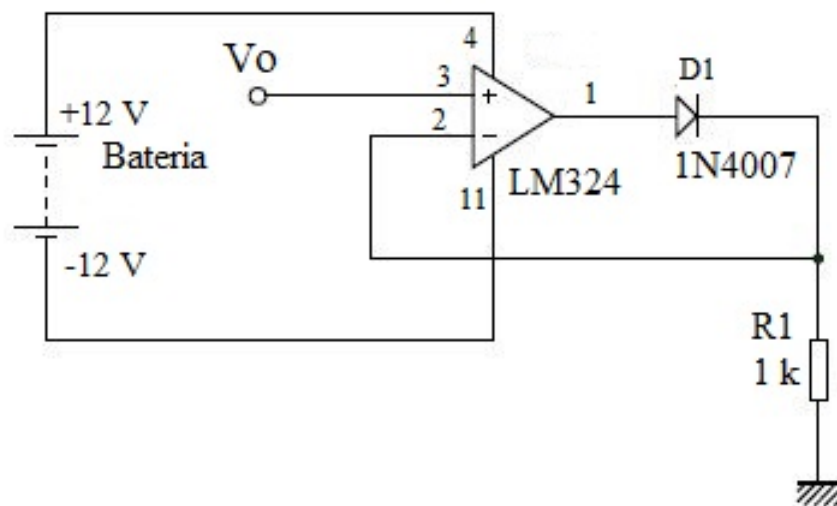
Figura 45 – Resposta no domínio da frequência para a simulação do filtro passa faixa



ANEXO C – Superdiodo

Um circuito utilizando amplificador LM324 e diodo 1N4007 foi inserido ao circuito total com o objetivo de retirar a componente negativa do sinal resposta, pois o arduino poderia ser danificado ao receber uma tensão simétrica. Na Figura 46 é mostrada a configuração do circuito conhecido como superdiodo, trata-se de um retificador de precisão, o qual é usado quando não deseja-se a queda de tensão dos diodos, pois, como trata-se de um sinal relativamente baixo, não é possível desconsiderar a queda de tensão nos diodos.

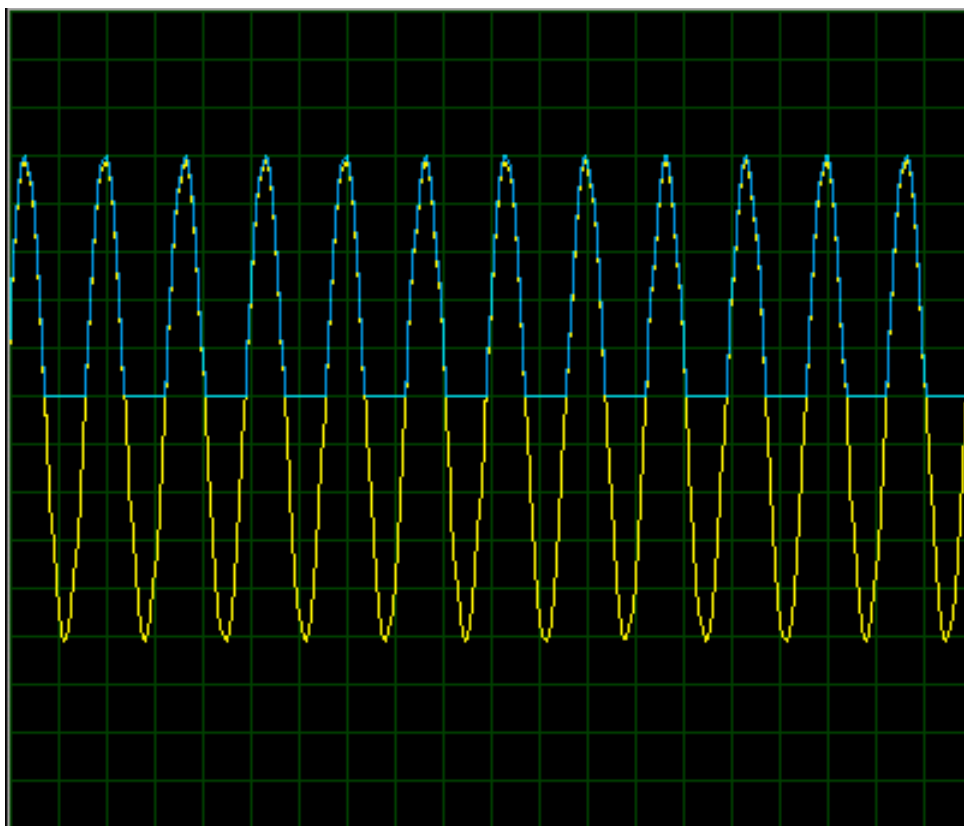
Figura 46 – Circuito do retificador de precisão usado para retirar a componente negativa do sinal de forma a evitar danos no arduino.



Fonte: Autora.

Na Figura 47 é apresentada a simulação do superdiodo feita no *software* proteus. Mostra-se um comparativo entre o sinal de entrada do retificador de precisão e sua saída.

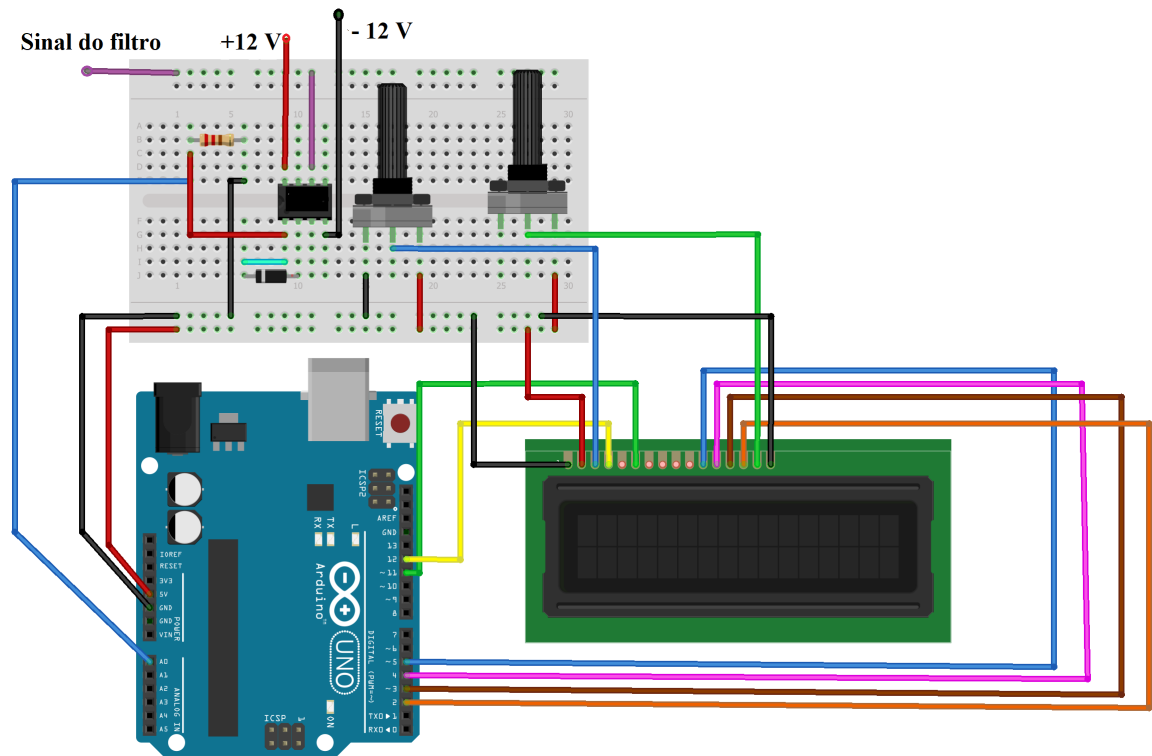
Figura 47 – Simulação do retificador de precisão. Na entrada do circuito é colocado um sinal simétrico (amarelo), e na saída é obtida a resposta do sinal retificado (azul) sem a queda de tensão que acontece nos retificadores convencionais.



Fonte: Autora.

ANEXO D – Circuito com Arduino

Figura 48 – Montagem Arduino e superdiodo

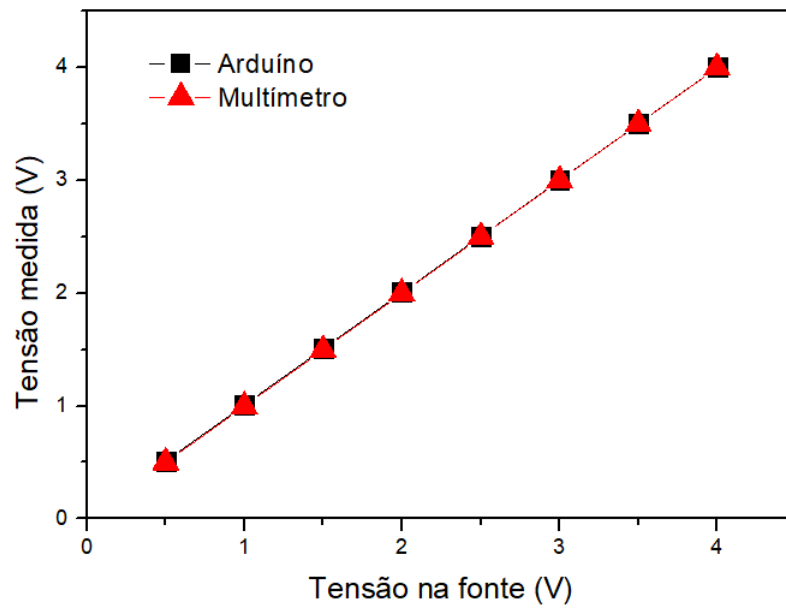


Fonte: Autora.

ANEXO E – Teste experimental usando Arduino

Na Figura 49 é mostrado o gráfico de comparação das tensões medidas pelo Arduino e pelo multímetro ao inserir um sinal contínuo em suas respectivas pontas de provas.

Figura 49 – Comparação da tensão medida no Arduino e no multímetro



Fonte: Autora.