



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ELETRÔNICA E SISTEMAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

ALLAMYS ALLAN DIAS DA SILVA

**SENSORES E DISPOSITIVO A FIBRA ÓPTICA BASEADOS EM EFEITO
MAGNETO-ÓPTICO**

Recife
2023

ALLAMYS ALLAN DIAS DA SILVA

**SENSORES E DISPOSITIVO A FIBRA ÓPTICA BASEADOS EM EFEITO
MAGNETO-ÓPTICO**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Fotônica.

Orientador: Prof. Dr. Joaquim Ferreira Martins Filho.

Coorientador: Prof. Dr. Jehan Fonseca do Nascimento.

Recife

2023

Catálogo na fonte
Bibliotecária Margareth Malta, CRB-4 / 1198

S586a	Silva, Allamys Allan Dias da. Sensores e dispositivo a fibra óptica baseados em efeito magneto-óptico / Allamys Allan Dias da Silva – 2023. 97 f.: il., figs., tabs., abrev. e siglas. Orientador: Prof. Dr. Joaquim Ferreira Martins Filho. Coorientador: Prof. Dr. Jehan Fonseca do Nascimento. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, 2023. Inclui Referências e Apêndices. 1. Engenharia Elétrica. 2. Sensores e dispositivos ópticos. 3. Fibra óptica. 4. Campo magnético. 5. Efeito magneto-óptico. 6. Controle de polarização. 7. COMSOL multiphysics. I. Martins Filho, Joaquim Ferreira (Orientador). II. Nascimento, Jehan Fonseca do (Coorientador). III. Título. UFPE 621.3 CDD (22. ed.) BCTG/2024-22
-------	---

ALLAMYS ALLAN DIAS DA SILVA

**SENSORES E DISPOSITIVO A FIBRA ÓPTICA BASEADOS EM EFEITO
MAGNETO-ÓPTICO**

Tese apresentada ao Centro de
Tecnologia e Geociências, como requisito
parcial para a obtenção do título de Doutor
em Engenharia Elétrica. Área de
concentração: Fotônica.

Aprovada em: 15/12/2023

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Joaquim Ferreira Martins Filho (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Renato Evangelista de Araujo (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Luis Henrique Vilela Leão (Examinador Externo)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Antonio Azevedo da Costa (Examinador Externo)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Charlie Salvador Gonçalves (Examinador Externo)
Universidade Federal da Paraíba

AGRADECIMENTOS

O reconhecimento, e, por consequente, a gratidão são algumas das virtudes mais justa que existem. Esse trabalho não é produto de uma pessoa só, mas de um grupo. Por isso é importante aqui deixar os agradecimentos as pessoas que contribuíram para essa tese.

Começo agradecendo ao meu orientador, Prof. Joaquim F. Martins Filho, por ter depositado sua confiança em mim e ter me aceitado no seu Grupo de Pesquisa em Sensores e Instrumentação. Agradeço por suas orientações, sempre muito claras e precisas. Foi um grande aprendizado todo esse tempo que trabalhamos juntos.

Aqui, expresso minha imensa gratidão ao meu co-orientador, Prof. Jehan Fonsêca do Nascimento, já faz um bom tempo que trabalhamos juntos, desde da graduação, no entanto ainda tenho aprendido muito com seus ensinamentos. Obrigado por seu empenho em me orientar.

No decorrer do trabalho foi preciso do suporte de algumas pessoas para possibilitar a construção experimental do trabalho. Aqui faço um agradecimento ao Professor Antônio Azevedo do DF-UFPE por possibilitar a deposição dos materiais na fibra, e a seu orientado Eduardo, que deu toda assistência no momento das deposições. Também agradeço ao professor Luis Leão do NICEN, que também tive o prazer de ser seu aluno na graduação, por ceder alguns equipamentos e também compartilhar sua experiência na área de magnetismo comigo.

Agradeço aos meus amigos do Grupo de Sensores e Instrumentação: Hebio, Henrique, Marcio, Marianne, Raoni e Valdemir pelos conselhos e discursões, sempre produtivos, o que ampliou o horizonte dos diversos trabalhos que desenvolvemos em conjunto. Agradeço também pelos momentos de descontração, que foram muitos.

No decorrer de todo esse tempo de pós-graduação alguns amigos também foram muito presentes, deixo minha gratidão aos amigos que dividiram casa e muito momentos felizes: Igor, Italo, Filipe Martins e Filipe Santos.

Gostaria de agradecer imensamente a minha família, citando o nome dos meus Pais; Silvanete e Ailton, do meu irmão; César, e da minha companheira; Alana, agradeço todos meus familiares: Meus avos, minhas tias e primos que sempre foram muito presentes durante toda minha vida.

Por fim, agradeço a FACEPE pelo suporte financeiro que possibilitou o desenvolvimento desse trabalho.

RESUMO

Esta tese apresenta estudos de modelagem computacional e experimentais, para construção de sensores e dispositivos a fibra óptica, que utilizam os efeitos Faraday e Kerr magneto-ópticos. Os materiais magnéticos utilizados foram o Ce:YIG, ferro e permalloy Fe/Ni. Os sensores propostos são capazes de fazer o monitoramento de campo magnético com sensibilidade e faixa de operação variadas, em que uma das configurações pode alcançar uma faixa de operação de 0 à 200 mT. Em quanto a resolução, uma das estruturas simuladas alcançou um valor de 0,051 mT. Também foi estudada a influência da temperatura na modulação do sinal, quando o Ce:YIG faz parte da composição do sensor, em que foi obtido um valor de sensibilidade cruzada de $-3,27 \text{ mT/}^\circ\text{C}$, numa situação não otimizada do sensor. Uma metodologia sobre como otimizar o sensor para operar em uma determinada faixa de temperatura, de 55 a 75°C , também é discutida, onde foi alcançado um aumento da sensibilidade ao campo magnético, na faixa de temperatura delimitada, e a sensibilidade cruzada caiu para um valor de $-2,47 \text{ mT/}^\circ\text{C}$. Os experimentos com o permalloy mostram que efeitos de histerese prejudicam sua utilização como material magnético na composição do sensor. Em suma, os estudos realizados têm um viés de projetar e caracterizar a estrutura do sensor para que seu sinal seja otimizado a depender de sua aplicação. O sistema construído experimentalmente também serve para finalidade de caracterizar materiais magnético, e obter parâmetros magneto-ópticos desses materiais, foram encontrados os valores para rotação Kerr de $0,654^\circ$ para o ferro, e de $1,075^\circ$ para o permalloy. Com isso, foi estimado um valor para constante magneto-óptica de $0,021 - j0,032$ para o ferro, e de $0,034 - j0,053$ para o permalloy. Por fim, é proposto um dispositivo para controlar a polarização de uma onda eletromagnética, baseado no Efeito Faraday magneto-óptico e na absorção em uma fibra perfil D metalizada. O dispositivo pode ser controlado eletronicamente por solenoides, o que possibilita um melhor desempenho, quando comparado com controladores mecânicos. Os resultados das simulações mostram que o dispositivo pode polarizar e controlar a polarização da luz com uma perda de inserção máxima de 5,71 dB para uma onda não polarizada e mínima de 2,61 dB para uma onda já polarizada.

Palavras-chave: sensores e dispositivos ópticos; fibra óptica; campo magnético; efeito magneto-óptico; controle de polarização; COMSOL multiphysics.

ABSTRACT

This thesis presents computational modeling and experimental studies for the construction of fiber optic sensors and devices, which use the magneto-optical Faraday and Kerr effects. The magnetic materials used were Ce:YIG, iron and permalloy Fe/Ni. The proposed sensors are capable of monitoring the magnetic field with varying sensitivity and operating range, in which one of the configurations can reach an operating range of 0 to 200 mT. The influence of temperature on signal modulation was also studied, when Ce:YIG is part of the sensor composition, in which a cross sensitivity value of $-3.27 \text{ mT/}^{\circ}\text{C}$ was obtained, in a non-optimized sensor situation. A methodology on how to optimize the sensor to operate in a certain temperature range, from 55 to 75 $^{\circ}\text{C}$, is also discussed, where an increase in sensitivity to the magnetic field was achieved, in the delimited temperature range, and the cross sensitivity dropped to a value of $-2.47 \text{ mT/}^{\circ}\text{C}$. Overall, the sensitivity results obtained are comparable with those found in the literature, with one of the simulated structures achieving a resolution of 0.051 mT. Experiments with permalloy show that hysteresis effects hinder its use as a magnetic material in the sensor composition. In short, the studies carried out have a bias towards designing and characterizing the sensor structure so that its signal is optimized depending on its application. The experimentally constructed system also serves the purpose of characterizing magnetic materials, and obtaining magneto-optical coatings from these materials. Kerr rotation values were found to be 0.654° for iron, and 1.075° for permalloy. With this, a value for the magneto-optical constant of $0.021 - j0.032$ for iron, and $0.034 - j0.053$ for permalloy was estimated. Finally, a device is proposed to control the polarization of an electromagnetic wave, based on the magneto-optical Faraday Effect and absorption in a metallized D-profile fiber. The device can be electronically controlled by solenoids, which allows for better performance when compared to mechanical controllers. The simulation results show that the device can polarize and control the polarization of light with a maximum insertion loss of 5.71 dB for an unpolarized wave and a minimum of 2.61 dB for an already polarized wave.

Keywords: optical sensors and devices; fiber optics; magnetic field; magneto-optical effect; polarization control; COMSOL multiphysics.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	Linha do tempo para os estudos na área de magneto-óptica	15
Figura 2 -	Imagens ilustrativas para aplicação na área de exames médicos (BLASIAK et al., 2015), em falhas e corrosão em estruturas metálicas (KIM; PARK, 2018), detecção e localização de objetos metálicos de grande porte (LENZ; EDELSTEIN, 2006) e no monitoramento de equipamentos elétricos, tal como transformadores de potência (KEBRITI; HOSSIENI, 2022)	17
Figura 3 -	Esquema de sensor de interferometria modal para monitoramento de campo magnético	21
Figura 4 -	Espectro de transmissão de um sensor de interferência modal	22
Figura 5 -	Esquema de sensor de cavidade de Fabry-Perot para monitoramento de campo magnético	23
Figura 6 -	Espectro de reflectância de um sensor de cavidade de Fabry-Perot	24
Figura 7 -	Esquema de sensor de fibra com grade de Bragg para monitoramento de campo magnético	25
Figura 8 -	Espectro de Transmissão de um sensor dupla grade de Bragg em fibra óptica.	26
Figura 9 -	Esquema de sensor de efeito Faraday para monitoramento de campo magnético	27
Figura 10 -	Transmissão de um sensor de efeito magneto-óptico	28
Figura 11 -	Esquema do sensor à fibra óptica de campo magnético por reflectometria	29
Figura 12 -	Ilustração do sistema de coordenadas adotado	30
Figura 13 -	Modelo físico para a estrutura de bulk do transdutor	33
Figura 14 -	Contorno irregular onde é inserida uma malha (formado por nós e elementos)	36
Figura 15 -	Interface do COMSOL para o módulo Electromagnetic Waves, Frequency Domain	37
Figura 16 -	Geometria do modelo físico no COMSOL para estrutura de fibra óptica	38

Figura 17 -	Caracterização de uma região no COMSOL	39
Figura 18 -	Condição para o espalhamento da onda no domínio do modelo	40
Figura 19 -	Plot de superfície da norma do campo elétrico no domínio do transdutor, para modelo de fibra	41
Figura 20 -	reflectância em função da espessura do filme de Fe	45
Figura 21 -	reflectância em função do campo magnético, para 50 nm de espessura do filme de Fe	46
Figura 22 -	Distribuição de potência óptica para os modelos (a) 3D e (b) 2D de fibra, para o transdutor Tipo I	46
Figura 23 -	Curvas de nível de ΔR para uma variação de campo magnético nulo até (a) 200 mT (saturação) e (b) 40 mT	47
Figura 24 -	Distribuição da componente P do campo elétrico ao longo das interfaces de fibra/Ce:YIG/alumínio para campo magnético (a) nulo e (b) de saturação	48
Figura 25 -	Curvas de reflectância para as ondas P e S obtidas pelo modelo analítico (estrutura de bulk) e pelo modelo numérico (estrutura de fibra óptica) como função do campo magnético (a) até a saturação (com 4,3 μm de Ce:YIG) e (b) longe da saturação (com 19,11 μm de Ce:YIG) do material magnético	49
Figura 26 -	Curvas de Reflectância para onda P considerando o efeito da temperatura na (a) resposta magneto-óptica e (b) apenas no índice de refração	51
Figura 27 -	Sensibilidades em relação ao campo magnético em função da temperatura na região de detecção (SB), curva e eixos em preto, e à temperatura em função do campo magnético (ST), curva e eixos em azul	52
Figura 28 -	Curvas de nível para reflectância da onda P	53
Figura 29 -	Curvas de nível de ΔR para uma variação de campo magnético nulo até o campo de saturação do Ce:YIG	54
Figura 30 -	Curvas de Reflectância para onda P considerando o efeito da temperatura na (a) resposta magneto-óptica e (b) apenas no índice de refração	54

Figura 31 -	Sensibilidades em relação ao campo magnético em função da temperatura na região de detecção (SB), curva e eixos em preto, e à temperatura em função do campo magnético (ST), curva e eixos em azul, para uma estrutura otimizada para atuar sob 55-75 °C	55
Figura 32 -	Suporte para preparar múltiplas estruturas sensoras	56
Figura 33 -	Equipamento de sputtering utilizado na deposição (a) com câmara de vácuo fechada (b) com câmara de vácuo aberta	57
Figura 34 -	(a) Câmara do sputtering onde podem ser vistos os eletrodos e a posição das fibras dentro da câmara (b) Posição onde é colocado o suporte com as fibras	57
Figura 35 -	Imagens a) do solenoide construído e b) do eletroímã posicionado para a realização das medidas	58
Figura 36 -	Gráfico dos pontos coletados para o campo magnético do eletroímã em função da corrente aplicada em seus terminais, juntamente com o ajuste linear aos pontos	59
Figura 37 -	Gráficos da função $\text{Cos}^2(\theta)$, curva em azul, e de sua derivada, curva vermelha	60
Figura 38 -	Curvas de Sinal normalizado para onda S em função do campo magnético normalizado, para ângulos de polarização de incidência de (a) 0°, 0,3°, 1°, (b) 5°, 20° e 45°	61
Figura 39 -	Gráficos da inclinação das restas, que se ajustam as curvas de sinal normalizado, em função do ângulo de polarização da onda incidente	61
Figura 40 -	Gráficos dos pontos experimentais do sinal normalizado em função do campo magnético aplicado, juntamente com as suas restas de ajuste linear	63
Figura 41 -	Gráficos do sinal normalizado em função do campo magnético aplicado, para ângulos de incidência de -20° e 20°	63
Figura 42 -	Gráficos do sinal normalizado da onda S em função do campo magnético aplicado, para ângulos de incidência de 5° e 45°	64
Figura 43 -	Gráficos do sinal normalizado em função do campo magnético aplicado, para ângulos de incidência de -45° e 45°	65

Figura 44 -	Sinal normalizado em função do campo magnético (a) com valores positivos e variação crescente, e (b) com valores negativos e variação decrescente	66
Figura 45 -	Gráficos do sinal normalizado com o aumento do campo, pontos azuis, e diminuindo o campo estando o material magnetizado, pontos vermelhos	68
Figura 46 -	Sinal normalizado em função do campo magnético (a) para uma variação de campo de -166 a 166 mT, e (b) para uma variação de 33 a -33 mT	68
Figura 47 -	Exemplo de uma curva de histerese	70
Figura 48 -	Gráficos do sinal normalizado, simular a uma curva de histerese	70
Figura 49 -	ajustes aos pontos experimentais e resultado da simulação numérica, usando as constantes magneto-ópticas obtidas, para a) o ferro e b) o permalloy	72
Figura 50 -	Arquitetura do controlador de polarização à fibra óptica	76
Figura 51 -	Rotação do ângulo de polarização em função da espessura do filme de Ce:YIG, para um campo de 20 mT	78
Figura 52 -	Distribuição do campo elétrico na estrutura para um campo magnético de 20 mT na segunda camada de material magnético para as componentes a) S e b) P	79
Figura 53 -	Curvas de Transmitância em função do campo aplicado na segunda camada de material magnético para as ondas S e P. As curvas em azul são para o caso de campo magnético nulo aplicado na primeira camada de material magnético e as em vermelho para um campo aplicado de -10 mT	80

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros usados nas simulações	42
Tabela 2 - Sensibilidades para transdutor Tipo II para diferentes faixas de operação	50
Tabela 3 - Sensibilidades de alguns sensores de campo magnético à base de fibra óptica	67
Tabela 4 - Parâmetros usados na simulação numérica	77

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	14
1.1	CONTEXTO HISTÓRICO E ATUAL DOS EFEITOS MAGNETO-ÓPTICOS	14
1.2	SENSORES E DISPOSITIVOS MAGNETO-ÓPTICOS.....	15
1.3	OBJETIVOS E ORGANIZAÇÃO DA TESE.....	19
2	SENSORES A FIBRA ÓPTICA DE CAMPO MAGNÉTICO.....	21
2.1	INTERFEROMETRIA MODAL.....	21
2.2	CAVIDADE DE FABRY-PEROT.....	23
2.3	GRADE DE BRAGG.....	25
2.4	EFEITO MAGNETO-ÓPTICO.....	26
3	METODOLOGIA PARA CONSTRUÇÃO DO SENSOR DE CAMPO MAGNÉTICO.....	29
3.1	APARATO EXPERIMENTAL.....	29
3.2	MODELAGEM COMPUTACIONAL DO ELEMENTO SENSOR.....	31
3.2.1	Modelo de Fresnel.....	33
3.2.2	Modelo numérico no comsol multiphysics.....	35
3.3	CONSIDERAÇÕES ADOTADAS PARA REALIZAÇÃO DA MODELAGEM.....	41
4	RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS.....	44
4.1	ELABORAÇÃO DO TRANSDUTOR PARA MONITORAMENTO DO CAMPO MAGNÉTICO.....	44
4.1.1	Transdutor tipo I - filme de ferro.....	44
4.1.2	Transdutor tipo II - camada de Ce:YIG.....	47
4.2	EFEITOS DE TEMPERATURA NA MODULAÇÃO DO SINAL.....	50
4.2.1	Otimização do transdutor para temperaturas altas.....	53
5	SISTEMA SENSOR DE CAMPO MAGNÉTICO.....	56
5.1	PREPARAÇÃO DE TRANSDUTORES COM FILMES METÁLICOS.....	56
5.2	FABRICAÇÃO DO ELETROÍMÃ.....	58
5.3	ANÁLISE DO SISTEMA DE POLARIZAÇÃO.....	59
5.4	RESULTADOS EXPERIMENTAIS.....	61
5.4.1	Experimentos com ferro.....	62
5.4.2	Experimentos com permalloy ferro(81)/níquel(19).....	64

5.4.3	Método para obtenção da rotação kerr e constante magneto-óptica....	71
6	CONTROLADOR DE POLARIZAÇÃO BASEADO NO EFEITO FARADAY INTEGRADO COM FIBRA ÓPTICA DE PERFIL D METALIZADA.....	73
6.1	MATRIZES DE JONES E EFEITO MAGNETO-ÓPTICO.....	73
6.2	MODELAGEM COMPUTACIONAL DO CONTROLADOR DE POLARIZAÇÃO.....	75
6.3	RESULTADOS DA MODELAGEM DO CONTROLADOR DE POLARIZAÇÃO.....	77
7	CONCLUSÃO E PERSPECTIVAS FUTURAS.....	81
	REFERÊNCIAS.....	85
	APÊNDICE A - CÓDIGO DO PROGRAMA FEITO EM LINGUAGEM MATLAB, PARA A MODELAGEM ANALÍTICA.....	90
	APÊNDICE B – CÓDIGO DE PROGRAMA EM PYTHON PARA AUTOMATIZAÇÃO DO SISTEMA.....	93
	APÊNDICE C – LISTA DE PUBLICAÇÕES.....	96

1 INTRODUÇÃO

O estudo do campo magnético vem trazendo grandes avanços tecnológicos desde que Oersted, em 1820, correlacionou uma corrente elétrica com a geração de um campo magnético (SADIKU, 2004). Atualmente, a utilização e sensoramento do campo magnético tem uma grande importância nas mais diversas áreas, tais como: navegação, telecomunicações, armazenamento de dados, geofísica, sistemas espaciais, diagnósticos médicos/biológicos, controle e monitoramento de processos industriais (LENZ; EDELSTEIN, 2006; RIZAL; SHIMIZU; MEJÍA-SALAZAR, 2022).

Tendo em vista essa importância e abrangência em que o campo magnético está inserido, esta tese aborda a modelagem e a construção experimental de sensores e dispositivos ópticos, que têm seu funcionamento baseados no efeito magneto-óptico. Neste capítulo, o leitor é introduzido sobre o efeito magneto-óptico e suas aplicações, dando ênfase a sensores e dispositivos à fibra óptica, que é o objeto desta tese. Dessa forma, na Seção 1.1 é descrito o contexto histórico do efeito magneto-óptico e suas aplicações, já na Seção 1.2, é abordado, mais especificadamente, as aplicações de sensores e dispositivos ópticos, e encerrando o capítulo, são mostrados os objetivos e a organização da escrita desta tese.

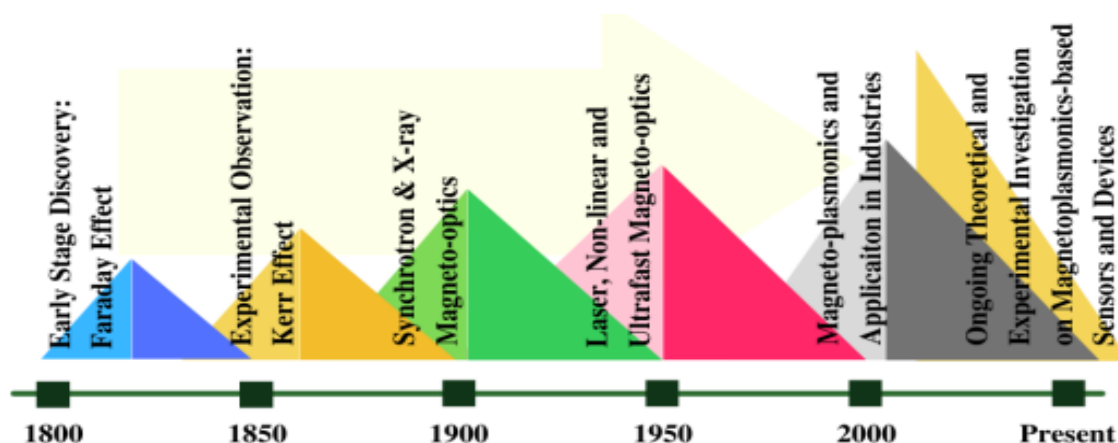
1.1 CONTEXTO HISTÓRICO E ATUAL DOS EFEITOS MAGNETO-ÓPTICOS

Se tratando dos efeitos magneto-ópticos, um dos pioneiros nesse estudo foi Michael Faraday, quando em 1845, tentava descobrir como uma força magnética afetaria uma onda eletromagnética. Após vários testes com diferentes materiais, em 13 de setembro daquele ano, usando amostras de vidro sob efeito de um campo magnético externo, observou uma rotação na polarização da luz transmitida nas suas amostras magnetizadas. Esse efeito ganharia seu nome (MANSURIPUR, 1999).

Em 1877, John Kerr, examinando a polarização da luz refletida em um polo polido de um eletroímã, conseguiu observar um efeito análogo ao de Faraday, porém observando a reflexão da luz. Devido às suas pesquisas relacionadas ao efeito magneto-óptico, Kerr, em 1898, recebeu a *Royal Medal*. O apresentador do evento na ocasião disse que era maravilhoso como Kerr aprendeu tanto com “*comparatively simple and ineffectual apparatus at his disposal.*”, então Kerr o respondeu “*Simple it may be, but not ineffectual; rude, but not crude.*” (QIU, Z. Q.; BADER, S. D., 2000).

Além de ajudar no complemento da teoria eletromagnética, a descoberta desses feitos acarreta em uma grande quantidade de aplicações tecnológicas. O efeito Faraday, por exemplo, tem sido usado para desenvolver sensores, dispositivos ópticos não recíprocos e sistemas de laser (RIZAL; SHIMIZU; MEJÍA-SALAZAR, 2022; ZHANG, J. et al., 2022). Por outro lado, o efeito Kerr permite medir ou visualizar o estado magnético do material; como resultado, tem sido aplicado em espectroscopia e aplicações de arquivamento de dados (RIZAL; SHIMIZU; MEJÍA-SALAZAR, 2022; KIMEL et al., 2022). Mais recentemente, o desenvolvimento da nanotecnologia e de ferramentas modernas de nano fabricação levou à exploração dos fenômenos magneto-ópticos em micro e nanoescala para uma nova geração de dispositivos, que podem ter suas propriedades ópticas manipuladas ativamente através do uso de campos magnéticos (HAIDER, T., 2017). No entanto, esse último é desafiado por efeitos fracos de MO nos comprimentos de onda visíveis e infravermelhos (RIZAL; SHIMIZU; MEJÍA-SALAZAR, 2022). Uma ilustração de toda essa trajetória pode ser vista na linha do tempo da Figura 1, que começa com a descoberta de Faraday até os estudos que atualmente estão sendo mais fortemente foco de estudos.

Figura 1 - Linha do tempo para os estudos na área de magneto-óptica



Fonte: RIZAL; SHIMIZU; MEJÍA-SALAZAR, 2022.

1.2 SENSORES E DISPOSITIVOS MAGNETO-ÓPTICOS

Como ilustrado na Figura 1, dentro da pesquisa sobre o efeito magneto-óptico, atualmente, uma das áreas que vem levantando o interesse da comunidade científica,

é a de sensores e dispositivos. Para a área de sensores podemos destacar alguns exemplos de aplicações:

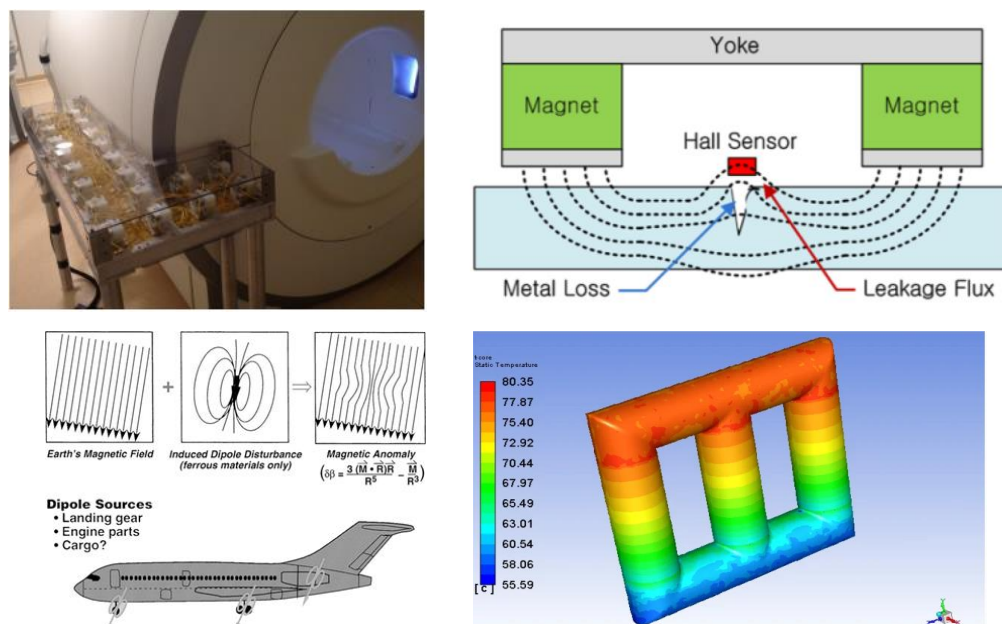
- Distribuição de energia: Sensores magneto-ópticos podem monitorar a corrente e a tensão em linhas de energia, transformadores e geradores, através do campo magnético nominal ou residual. Eles também podem fornecer filtragem de energia, balanceamento de carga e detecção de falhas para *data centers* e servidores (SILVA et al., 2012; KUMARI; CHAKRABORTY, 2018);
- Fluidos e Gases: Sensores magneto-ópticos podem medir a vazão, pressão e temperatura de fluidos e gases. Eles também podem detectar vazamentos, bloqueios e corrosão em dutos, tubulações e tanques (KIM; PARK, 2018; SHI et al., 2015);
- Navegação e Comunicação: Sensores magneto-ópticos podem determinar a direção e localização de veículos, aeronaves e navios usando o campo magnético da Terra. Eles também podem se comunicar com outros dispositivos utilizando sinais magnéticos (LENZ; EDELSTEIN, 2006; HOTT; HOEHER; REINECKE, 2019);
- Médico e Biológico: Sensores magneto-ópticos podem gerar imagens das estruturas e funções internas do corpo humano usando imagens de ressonância magnética (MRI). Eles também podem monitorar a atividade e a saúde de células, tecidos e órgãos usando nanopartículas magnéticas (KIMEL et al., 2022; BLASIAK et al., 2015).

Na Figura 2 estão ilustração que representam as aplicações citadas.

Em certas aplicações, além de estar sob variação de campo magnético, a região de sensoriamento também sofre com variações de temperatura, tal como acontece em um transformador de potência, que sofre o efeito dessas variações ao longo do dia (KEBRITI; HOSSIENI, 2022). Sendo assim, alguns estudos de sensores de campo magnético, encontrados na literatura, apontam a importância da compensação de temperatura na resposta do sensor (PENG ZU et al., 2012; SUN; JIANG, S.; MARCIANTE, 2010). Em alguns estudos, é demonstrado que variações a partir de 1°C já são suficientes para interferir no correto monitoramento do campo

magnético. Logo, é necessária a compensação da variação de temperatura (PENG ZU et al., 2012; CHEN, F. et al., 2015).

Figura 2 - Imagens ilustrativas para aplicação na área de exames médicos (BLASIAK et al., 2015), em falhas e corrosão em estruturas metálicas (KIM; PARK, 2018), detecção e localização de objetos metálicos de grande porte (LENZ; EDELSTEIN, 2006) e no monitoramento de equipamentos elétricos, tal como transformadores de potência (KEBRITI; HOSSIENI, 2022)



Fonte: O Autor, 2023.

Algumas soluções propostas na literatura para resolver essa medida cruzada são utilizar duas cabeças sensores, uma para monitorar a temperatura, para que seja possível calibrar o sensor de acordo com a temperatura, como exemplo pode ser utilizada uma fibra de grade de Bragg (SUN; JIANG, S.; MARCIANTE, 2010; YANG et al., 2009). Outra proposta de sensor é baseada em interferência modal e utiliza o fato de que diferentes modos possuem diferentes sensibilidades aos parâmetros de campo magnético e temperatura. Assim, monitorando os sinais de diferentes ordens de modo, é possível relacionar as sensibilidades para obter dados de campo magnético e temperatura simultaneamente (YU et al., 2022; MO et al., 2021).

Em se tratando de sensores, dentre os diversos tipos, os a base de fibra óptica vêm ganhando muito espaço na área de sensoriamento. Isso porque as técnicas de monitoramento por fibra óptica oferecem muitas vantagens como simplicidade, versatilidade, segurança, baixo peso e confiabilidade (PENDÃO; SILVA, I., 2022; OLIVEIRA, DE et al., 2023). Além disso, eles podem transportar sinais ópticos por longas distâncias sem perda considerável de sinal e livres de interferência eletromagnética externa (HAUS, J., 2010; Martins-Filho et al., 2007). As técnicas de

detecção mais comumente usadas para sensores de campo magnético à fibra óptica usam interferência modal, cavidade de Fabry-Perot, grades de Bragg e efeitos magneto-ópticos (ZHANG, J. et al., 2022; DIAS DA SILVA et al., 2020).

Tendo em vista as vantagens e todo o potencial que ainda está sendo desenvolvido dos sistemas a fibra óptica, um dos focos de pesquisa de grande importância é o controle da polarização da luz nas fibras ópticas, que é importante em aplicações modernas de fotônica e telecomunicações (PHOENIX et al., 2020; HUANG, Zhimeng et al., 2013; MARTINELLI; MARTELLI; PIETRALUNGA, 2006). Ou seja, a capacidade de manipular a polarização da propagação da luz através de fibras ópticas é um aspecto crítico para garantir a transmissão eficiente e confiável de informações. Nesse contexto, as técnicas de controle de polarização em fibra surgiram como uma tecnologia chave para otimizar sistemas de fibra óptica.

Uma das principais motivações do controle de polarização em fibra é mitigar deficiências induzidas pela polarização em sistemas de comunicação óptica. Nos últimos anos, os avanços nas técnicas de controle de polarização em fibra não beneficiaram apenas as telecomunicações, mas também encontraram aplicações em vários campos, como imagens biomédicas, sensores, caracterização de materiais e óptica quântica (JINKUI CHU et al., 2014; RIZAL; SHIMIZU; MEJÍA-SALAZAR, 2022; KIMEL et al., 2022). Essas aplicações destacam a natureza versátil das técnicas de controle de polarização em fibra, e seu potencial para revolucionar uma ampla variedade de sistemas ópticos.

Várias técnicas chave foram desenvolvidas para enfrentar os desafios colocados pelo controle de polarização em fibras ópticas. Essas técnicas incluem componentes baseados em fibra, como controladores de polarização, polarizadores e fibras mantenedoras de polarização. Particularmente, se tratando de controladores de polarização, alguns dos mais comuns encontrados comercialmente são baseados em placas retardadoras de comprimento de onda, que utilizam a birrefringência linear de um material, ou aqueles causados por estresse mecânico (MARTINELLI; MARTELLI; PIETRALUNGA, 2006; THORLABS, 2023). Esses dispositivos normalmente envolvem atuação mecânica, como giro ou torção.

De forma geral, a utilização de efeitos magneto-ópticos combina muito bem com sistemas à fibra óptica, devido a também possibilitarem ao sistema tamanho compacto, peso leve, baixo custo e baixo consumo de energia. Dessa forma, tornando

todo o sistema apropriados para uma ampla variedade de locais e aplicações (RIZAL; SHIMIZU; MEJÍA-SALAZAR, 2022; KIMEL et al., 2022).

1.3 OBJETIVOS E ORGANIZAÇÃO DA TESE

É objetivo desse trabalho é empregar os efeitos magneto-ópticos de Faraday e Kerr para construção de sensores de campo magnético a fibra óptica, utilizando reflectometria. Para alcançar esse objetivo, foram feitos estudos computacionais por meio de simulações analíticas e numéricas, a fim de testar diferentes materiais e estruturas, faixas de operação para o sensor e efeitos de temperatura, desenvolvendo uma metodologia para projetar uma configuração otimizada do sensor para diferentes aplicações. Após os parâmetros ajustados no estudo computacional, foi construído o sistema sensor experimentalmente.

Além da prosta da construção do sensor de campo magnético, esta tese traz uma abordagem da utilização do sistema para caracterização de materiais, bem como uma modelagem de um dispositivo óptico para sistemas à fibra óptica, onde o dispositivo proposto é um controlador de polarização autorreferenciado, ou seja, a polarização da saída não depende da entrada. Esse dispositivo pode ser controlado eletronicamente, portanto pode vir a ser usado, também, como um modulador.

Por fim, esta tese, além do capítulo introdutório, está organizada da seguinte forma:

- ii) O capítulo 2 traz uma descrição de sensores à fibra óptica para monitoramento de campo magnético, que foram encontrados na literatura. Os tipos de sensores descritos utilizaram técnicas ou efeitos de interferência modal, cavidade de Fabry-Perot, grades de Bragg ou efeitos magneto-ópticos;
- iii) O capítulo 3 aborda as modelagens analítica e numérica para o projeto dos transdutores dos sensores, além do esquema experimental do sistema sensor;
- iv) O capítulo 4 mostra os resultados obtidos e a metodologia utilizada para otimizar a resposta dos sensores através de modelagem computacional, sendo que a modelagem analítica foi construída em linguagem *Matrix Laboratory* (MATLAB), e o modelo numérico, através do COMSOL *multiphysics*;

- v) O capítulo 5 apresenta atividades experimentais realizadas para construção do sistema sensor, trazendo também uma análise de todo o sistema sensor bem como os resultados obtidos com o sistema;
- vi) O capítulo 6 traz a concepção e modelagem de um controlador de polarização autorreferenciado, ou seja, a polarização da saída não depende da entrada. Esse dispositivo pode ser controlado eletronicamente, podendo vir a ter várias utilidades;
- vii) O capítulo 7 é o último capítulo da tese, que trata das conclusões obtidas acerca de todo trabalho realizado.

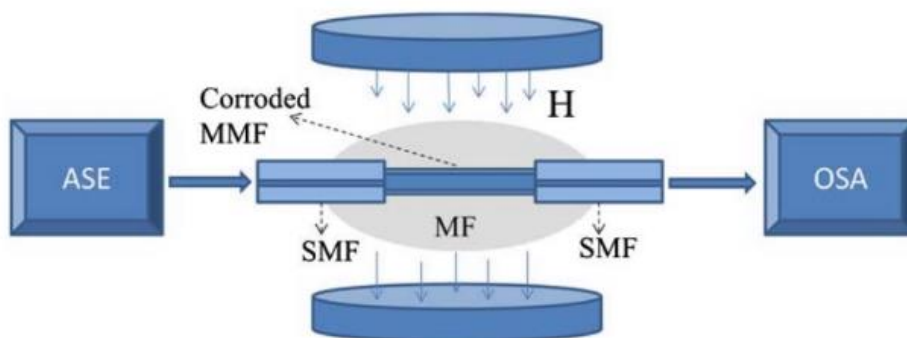
2 SENSORES A FIBRA ÓPTICA DE CAMPO MAGNÉTICO

Devido às vantagens de blindagem a interferências externas, possibilidade de medida a distância e confiabilidade da medida, sensores à fibra óptica têm um grande potencial nas mais diversas aplicações. Este capítulo é reservado para abordar alguns tipos de sensores à fibra óptica, para monitoramento de campo magnético. A divisão do capítulo é feita classificando o efeito físico utilizado pelo sensor, onde na Seção 2.1 são descritos sensores de interferometria modal, na Seção 2.2; cavidade de Fabry-Perot, Seção 2.3; grade de Bragg e na Seção 2.4; efeito magneto-óptico.

2.1 INTERFEROMETRIA MODAL

Explorando a possibilidade de propagação de vários modos em alguns tipos de fibra, os sensores por interferometria modal são baseados no acoplamento desses distintos modos em uma fibra monomodo (SMF) (WANG, H. et al., 2013; CHEN, Y. et al., 2013; YU et al., 2022; SUN, B. et al., 2018; LI, Y. et al., 2019). Geralmente, a estrutura desse tipo de sensor é formada por fibra multimodo (WANG, H. et al., 2013), fibra sem núcleo (CHEN, Y. et al., 2013), microestruturada (YU et al., 2022) ou cônica (SUN, B. et al., 2018), entre prolongamentos de fibras SMF. Então, essas fibras são colocadas em contato com algum elemento sensível ao campo magnético, em sua maioria, esses sensores propostos utilizam fluidos magnéticos como elemento sensor, que tem o índice de refração dependente da mudança da intensidade e direção do campo magnético (WANG, H. et al., 2013; CHEN, Y. et al., 2013; YU et al., 2022; SUN, B. et al., 2018). Dessa forma, o índice de refração efetivo ao redor do núcleo da fibra vira função do campo magnético, o que altera a propagação dos modos na fibra.

Figura 3 - Esquema de sensor de interferometria modal para monitoramento de campo magnético



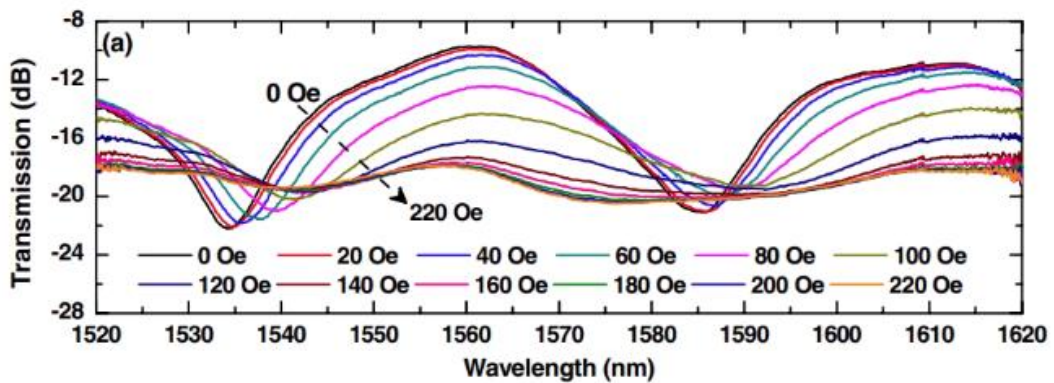
Fonte: Wang et. al, 2013.

A Figura 3 mostra o esquema do sensor proposto por Wang (WANG, H. et al., 2013), que usa um trecho de fibra multimodo com parte de sua casca corroída, e com suas extremidades conectadas a prolongamentos de fibra óptica monomodo padrão (SMF). Sendo assim, a parte externa dessa estrutura é colocada em contato com o fluido magnético. Portanto, o modo fundamental, LP_{01} , que se propaga na SMF excita outros modos de maior ordem na fibra multimodo, sendo a intensidade que será acoplada na fibra SMF de saída, e medida pelo analisador de espectro óptico (OSA), modelada pela seguinte equação (WANG, H. et al., 2013)

$$I(\lambda) = \sum_{i=1}^N c_i^2 I_0(\lambda) + \sum_{i \neq j=1}^N c_i c_j I_0(\lambda) \cos[(\beta_i - \beta_j)L] \quad (1)$$

em que I_0 é a intensidade do modo LP_{01} , c_i e β_i são o coeficiente de acoplamento e constante de propagação do modo LP_{0i} , e L o comprimento de fibra multimodo. No espectro da transmissão do sinal, é possível observar deslocamentos em seus vales por causa da alteração no índice de refração do fluido magnético, devido às variações de campo magnético. Um tipo de sinal característico dessa medida é visto na Figura 4 (CHEN, Y. et al., 2013).

Figura 4 - Espectro de transmissão de um sensor de interferência modal



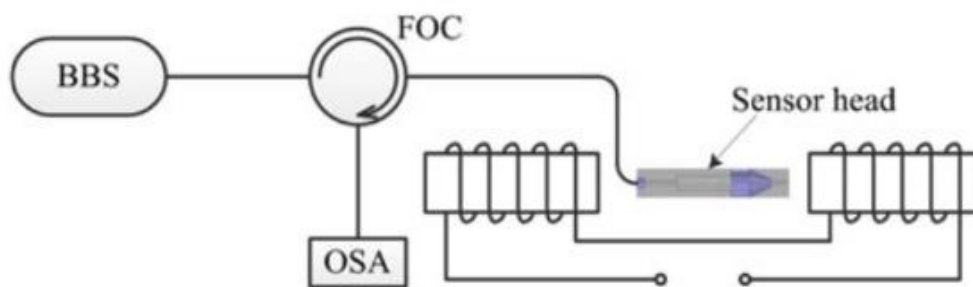
Fonte: Chen et. al, 2013.

Configurações semelhantes à usada por Wang (WANG, H. et al., 2013) são propostas por Chen (CHEN, Y. et al., 2013), em que a fibra multimodo é substituída por uma fibra sem núcleo (NCF). Já Sun (SUN, B. et al., 2018) utilizou uma fibra cônica, enquanto Yin (YU et al., 2022) construiu um sistema com fibra de cristal fotônico (PCF); nesse caso, o fluido magnético é injetado dentro dos canais da PCF.

2.2 CAVIDADE DE FABRY-PEROT

O efeito de Fabry-Perot é um fenômeno interferométrico que ocorre devido às várias reflexões nas interfaces de uma cavidade. A exemplo dos sensores de interferência modal, os sensores de campo magnético à fibra óptica, que utilizam o efeito de Fabry-Perot, geralmente, observam deslocamentos nos vales do espectro do sinal para monitorar indiretamente o campo magnético, no entanto é observada a reflectância do sinal (ZHANG, P. et al., 2015; ZHENG et al., 2017). A Figura 5 mostra o esquema de um sensor desse tipo (ZHANG, P. et al., 2015).

Figura 5 - Esquema de sensor de cavidade de Fabry-Perot para monitoramento de campo magnético



Fonte: Zhang et. al, 2015.

Muitos desses sensores utilizam um material magnetostrictivo, que possui a propriedade de sofrer deformações físicas quando submetido a um campo magnético externo, para alterar o comprimento da cavidade e assim o espectro de reflectância do sinal (CHEN, F. et al., 2015; ZHANG, P. et al., 2015). Explorando esse efeito, Zhang (ZHANG, P. et al., 2015) propôs um interferômetro de Fabry-Perot no qual a cavidade óptica é formada por duas fibras SMF colocadas face a face e separadas por uma coluna de ar, onde as fibras foram fixadas na base de Terfenol-D (ZHANG, P. et al., 2015). Assim, na presença de um campo magnético, o comprimento da base é aumentado, provocando alterações nas dimensões da cavidade. Uma configuração semelhante, porém, com uma finesse bem maior, é apresentada no trabalho de Chen (CHEN, F. et al., 2015), em que a cavidade de Fabry-Perot é gerada pela separação entre um sistema de espelhos e lentes fixados na face clivada de uma fibra óptica monomodo, e do outro lado a um material magnetostrictivo. Na presença de um campo magnético, esse material sofre deformações que alteram o comprimento da cavidade,

modificando o padrão de interferência observado pelo espectro de reflexão do sinal óptico (CHEN, F. et al., 2015).

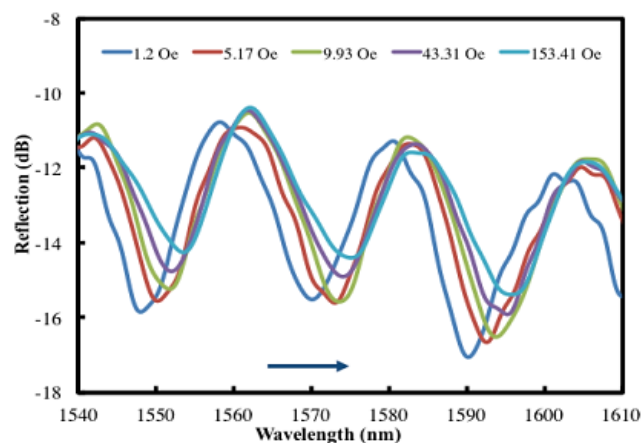
Diferente das estruturas que utilizam materiais magnetostrictivos, uma estrutura com fluido magnético dentro de fibras com núcleo vazado é montada por Zheng (ZHENG et al., 2017), em que o monitoramento do campo magnético é feito através da variação do índice de refração do MF.

Para os sensores que têm baixa reflexão nas interfaces da sua estrutura, é possível modelar o espectro da intensidade do sinal através da aproximação por dois feixes (ZHANG, P. et al., 2015; ZHENG et al., 2017). Assim, a intensidade do espectro de interferência é dada por (ZHENG et al., 2017):

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos\left(\frac{4\pi nL}{\lambda_0} + \phi_0\right), \quad (2)$$

em que I_1 é a intensidade do primeiro feixe refletido, I_2 é a intensidade do segundo feixe, L é o comprimento da cavidade, λ_0 é o comprimento de onda no espaço livre, n é o índice de refração do meio na cavidade e ϕ_0 é a diferença de fase inicial entre os dois feixes. Pela Equação 2, é observado que, tanto uma variação do comprimento da cavidade, como também do índice de refração, causa um deslocamento no espectro do sinal. O deslocamento das curvas do espectro do sinal devido à presença do campo magnético pode ser observado na Figura 6, que apresenta os dados experimentais obtidos por Zheng (ZHENG et al., 2017).

Figura 6- Espectro de reflectância de um sensor de cavidade de Fabry-Perot



Fonte: Zheng et. al, 2017.

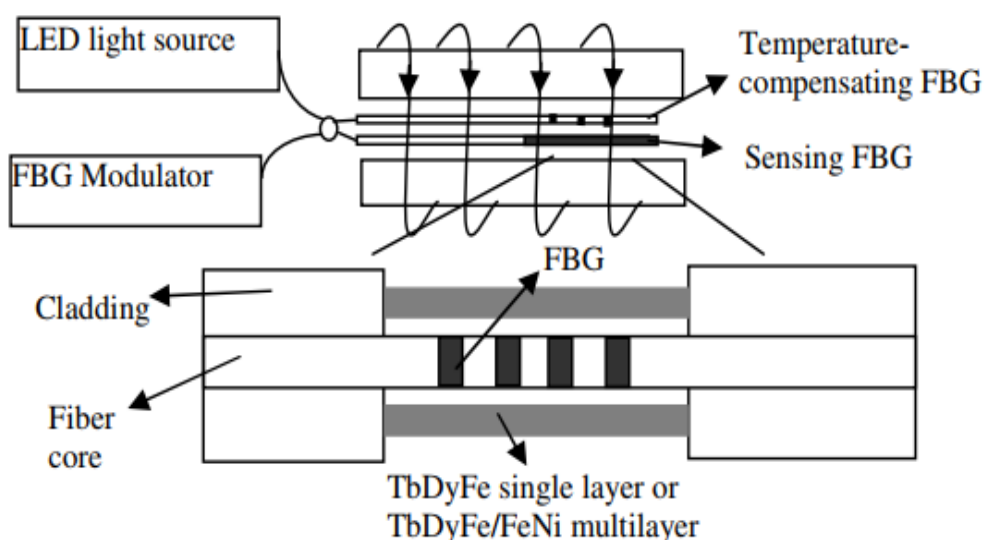
2.3 GRADE DE BRAGG

Alguns dos sensores de campo magnético à fibra óptica baseados em redes de Bragg também fazem uso de materiais magnetostrictivos. Esses sensores usam a deformação do material magnetostrictivo, na presença de um campo magnético, para causar alterações na periodicidade da rede de Bragg e, conseqüentemente, provocar um deslocamento no comprimento de onda de Bragg (YANG et al., 2009; LIU, H.; OR; TAM, 2012), que é dado pela seguinte equação (LIU, H.; OR; TAM, 2012):

$$\lambda_b = 2n_{eff}\Lambda \quad (3)$$

em que n_{eff} é o índice de refração da fibra com a grade de Bragg e Λ é a periodicidade da grade. Utilizando esse princípio, Liu, Or e Tam (LIU, H.; OR; TAM, 2012) construíram um sistema, onde a fibra de Bragg é fixada em uma base com compósito magnetostrictivo, que na presença de um campo magnético, causa uma alteração na periodicidade da grade de Bragg. Já Yang (YANG et al., 2009) propôs um sensor no qual parte da casca de um trecho de SMF é corroída, e em seguida, revestida com uma camada de material magnetostrictivo. Essa estrutura é mostrada na Figura 7, em que também aparece uma fibra com rede de Bragg comum, que serve para fazer a compensação de alterações de temperatura na região (YANG et al., 2009).

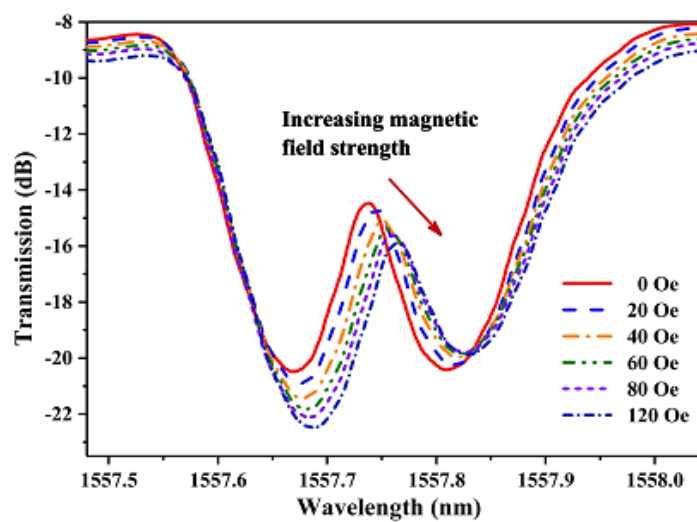
Figura 7 - Esquema de sensor de fibra com grade de Bragg para monitoramento de campo magnético



Fonte: Yang et. al, 2009.

Em vez de explorar o comprimento de onda de Bragg refletido na grade, e utilizando um fluido magnético como elemento sensor, Bao (BAO et al., 2018) constrói um sistema sensor que utiliza o espectro de transmissão do sinal que passa através de duas grades de Bragg. Entre as grades de Bragg há um gap da ordem de micrômetros que é preenchido pelo MF. Assim, os espectros de transmissão das duas grades têm uma diferença de fase, que é modulada pelo campo magnético sobre a região. O sinal característico desse sistema é observado na Figura 8, onde também é possível ver o deslocamento dos espectros devido ao campo magnético aplicado.

Figura 8 - Espectro de Transmissão de um sensor dupla grade de Bragg em fibra óptica



Fonte: Bao et. al, 2009.

2.4 EFEITO MAGNETO-ÓPTICO

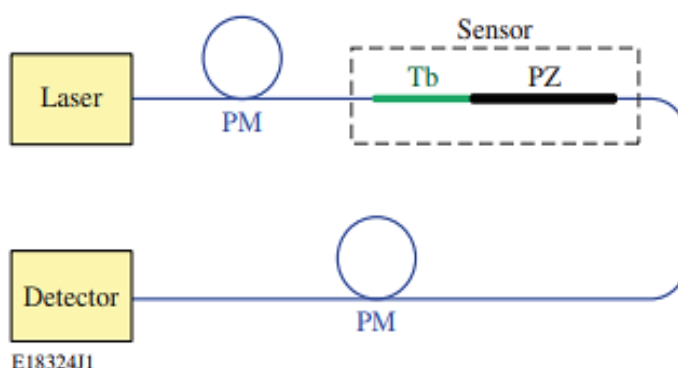
Diferente das outras técnicas destacadas anteriormente, a medida do campo magnético nesse tipo de sensor está atrelada à modulação da polarização do sinal (SUN; JIANG, S.; MARCIANTE, 2010; PANG et al., 2019). Em geral, a modulação do sinal é feita por meio do efeito Faraday, que descreve a rotação no plano de polarização de um feixe de luz linearmente polarizado ao atravessar um material magnetizado. Essa rotação é decorrência da birrefringência gerada no material sob a ação de um campo magnético. A rotação faraday em um material é (MANSURIPUR, 1999)

$$\phi_B = k_0 \delta n_B d, \quad (4)$$

em que k_0 é o número de onda no vácuo, δn_B é a variação do índice de refração do material devido à presença do campo magnético e d é a espessura do material magnético.

Baseado no efeito Faraday, Sun (SUN; JIANG, S.; MARCIANTE, 2010) construiu um aparato usando fibra dopada com térbio, pois a fibra dopada com térbio tem sua resposta magneto-óptica aumentada consideravelmente. Logo, a onda eletromagnética ao se propagar nessa região da fibra dopada, tem seu plano de polarização rotacionado devido ao efeito Faraday magneto-óptico, onde a luz transmitida passa por uma fibra polarizadora e após é detectada. O esquema desse sistema é visto na Figura 9 (SUN; JIANG, S.; MARCIANTE, 2010).

Figura 9 - Esquema de sensor de efeito Faraday para monitoramento de campo magnético

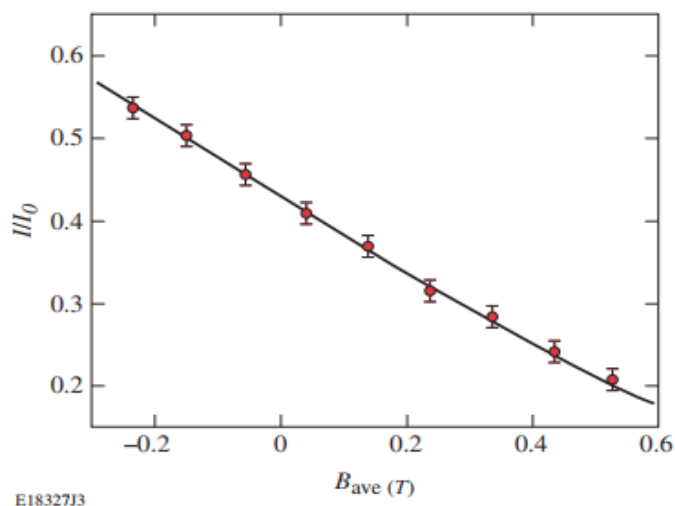


Fonte: Sun, Jiang e Marciante, 2010.

É importante destacar que estresses mecânicos em fibras comuns têm forte influência sobre a polarização do sinal óptico. Por isso, Sun (SUN; JIANG, S.; MARCIANTE, 2010) montou seu sistema utilizando fibra mantenedora de polarização. A Figura 10 mostra o sinal obtido por esse sistema, que apresenta a intensidade normalizada em função do campo magnético sobre a região da fibra dopada com térbio.

Ao invés de fibra dopada com térbio, Pang (PANG et al., 2019) construiu um sensor usando uma fibra vortex que permite a propagação dos modos com polarização circular (PANG et al., 2019). Então após ser modulado na fibra vortex, de acordo com o campo magnético, o sinal passa por um sistema de polarização e vai em direção a um detector, onde de acordo com a intensidade do sinal, é inferido o valor do campo magnético.

Figura 10 - Transmissão de um sensor de efeito magneto-óptico



Fonte: Sun, Jiang e Marciante, 2010.

Os sensores que serão apresentados nos capítulos seguintes desta tese, se encaixam nessa categoria. Algumas vantagens da utilização do efeito magneto-óptico na construção de sensores são:

- Compacto – a estrutura do transdutor pode ser construída em micro ou nanoescala, o que possibilita sua integração com sistemas eletrônicos;
- Ampla faixa dinâmica – É possível sintonizar a faixa de operação do sensor a fim de atender melhor a especificidade da aplicação desejada;
- Monitoramento multiponto – possibilidade de se construir um sistema que ao mesmo tempo monitore locais diferente;
- Simplicidade do sistema de detecção – A resposta do sensor pode ser vista apenas por um detector de potência, ao invés de um analisador de espectro óptico.

Na literatura se encontra alguns sensores que utilizam o efeito Faraday magneto-óptico, como citado nesta Seção, no entanto é difícil de encontrar trabalhos que utilizem o efeito Kerr em fibra óptica. Nesta tese são apresentadas estruturas que se utilizam dos dois efeitos.

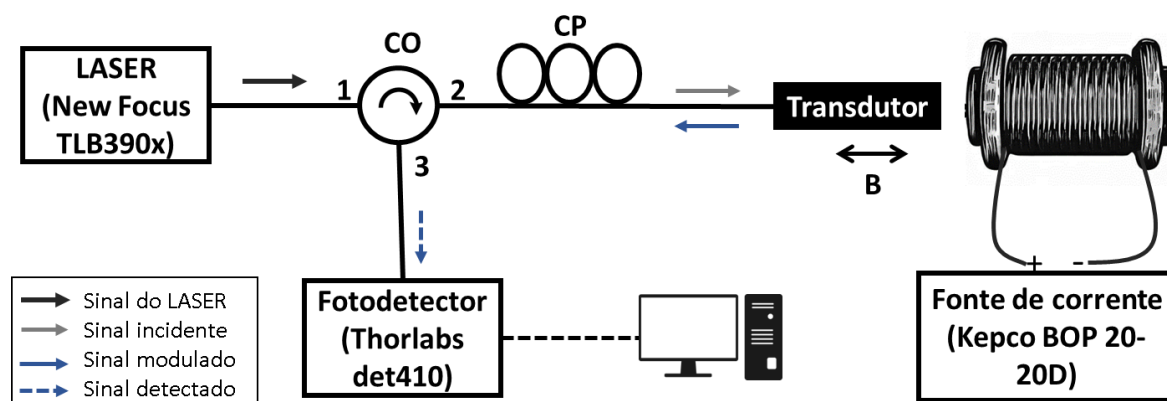
3 METODOLOGIA PARA CONSTRUÇÃO DO SENSOR DE CAMPO MAGNÉTICO

As descrições da estrutura para montagem experimental, bem como, das simulações para caracterização do sensor estão neste capítulo. Na Seção 3.1 é descrito o sistema sensor e seu funcionamento. Já na Seção 3.2 são abordadas as modelagens analítica, Subseção 3.2.1, e numérica, Subseção 3.2.2. O transdutor na estrutura de um sensor de medição indireta é responsável por fazer a ligação entre a variação da grandeza de interesse e a grandeza que é, de fato, mensurada pelo sensor. No caso desse estudo, a grandeza de interesse é o campo magnético que é medido através de reflectância de ondas polarizadas. Por fim, na Seção 3.3, estão as considerações tomadas para as realizações das simulações.

3.1 APARATO EXPERIMENTAL

Esta tese propõe a construção de um sensor reflectométrico a fibra óptica, que utiliza os efeitos Faraday e Kerr magneto-ópticos (MANSURIPUR, 1999; QIU, Z. Q.; BADER, S. D., 2000) para o monitoramento de campo magnético. O esquema proposto para o sensor está na Figura 11.

Figura 11 - Esquema do sensor à fibra óptica de campo magnético por reflectometria



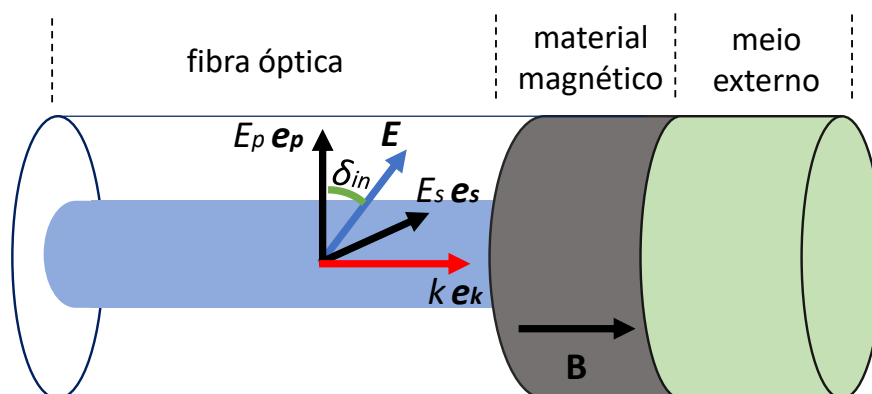
Fonte: O Autor, 2023.

Através da Figura 11 é possível entender o funcionamento do sensor, que consiste de um laser, acoplado em fibra óptica, emitindo um sinal com comprimento de onda em 1550 nm, no experimento foi utilizado um LASER de DFB da New Focus, o TLB390x. Esse sinal óptico é propagado em fibra óptica até a porta 1 do circulator

óptico (CO), do modelo CIR1550PM-APC da Thorlabs, além da função normal de um circulador, ele aplica uma alta perda à polarização coincidente com seu eixo rápido, assim atuando também como um polarizador, em que a polarização que sai dele é paralela ao seu eixo lento. Saindo pela porta 2 o sinal passa pelo controlador de polarização (CP), cuja sua polarização é controlada para um ângulo δ_{in} , no caso o CP utilizado foi o FPC032 da Thorlabs. A onda polarizada vai até o transdutor, onde tem sua polarização modulada, de acordo com o campo magnético, e é refletida em direção ao CO. Após retornar para porta 2, e sair na porta 3 do circulador, parte de sua intensidade é filtrada devido a função de polarizador do CO, essa variação de intensidade acontecerá de acordo com a modulação sofrida no transdutor. Por fim, a parte da luz que passa pela CO é detectada por um fotodetector, no caso foi utilizado o Det410 da Thorlabs. Todo o sistema, com exceção do controlador de polarização, é composto por fibras mantenedoras de polarização.

É importante destacar as definições para o sistema de coordenadas que foram usadas para a análise do sinal óptico modulado obtido. Tem-se a base ortonormal ($\mathbf{e}_s$, $\mathbf{e}_p$, $\mathbf{e}_k$), em que $\mathbf{e}_s$ e $\mathbf{e}_p$, indicam as direções das polarizações E_s e E_p do campo elétrico, e $\mathbf{e}_k$, a direção de propagação da luz. Além disso, δ_{in} é o ângulo de polarização da onda incidente, medido com relação a direção $\mathbf{e}_p$. Essas definições podem ser observadas na Figura 12. Por fim, é considerado que o eixo da fibra polarizada que permite a transmissão de luz é paralelo a $\mathbf{e}_s$. Assim, a medição no detector determina a potência da componente S do campo elétrico.

Figura 12 - Ilustração do sistema de coordenadas adotado



Fonte: O Autor, 2023.

3.2 MODELAGEM COMPUTACIONAL DO ELEMENTO SENSOR

Na tentativa de explicar o efeito magneto-óptico visto nos experimentos de Faraday, Maxwell, sabendo que uma luz linearmente polarizada pode vista como uma junção de duas ondas circularmente polarizadas, uma à direita e outra à esquerda, propôs que a rotação do plano de polarização da luz se dava devido à diferença entre os índices de refração para polarização circular à direita e à esquerda, onde essa birrefringência é causada devido à magnetização do material em que a onda eletromagnética se propaga (MAXWELL, J., 1873). A argumentação matemática para isso está ligada à permissividade elétrica do material (SATO; ISHIBASHI, 2022).

O tensor permissividade elétrica pode ser dividido em uma parte simétrica e outra parte anti-simétrica, já que cada elemento da matriz pode ser escrito como $\epsilon_{ij} = (\epsilon_{ij} + \epsilon_{ji})/2 - (\epsilon_{ij} - \epsilon_{ji})/2$. Fazendo uma diagonalização apropriada, a parte simétrica do tensor não irá contribuir para o efeito magneto-óptico, então o efeito dependerá apenas da parte anti-simétrica do tensor permissividade, que pode ser escrito da seguinte forma (CAREY; THOMAS, 1974):

$$\boldsymbol{\epsilon} = \epsilon \begin{pmatrix} 1 & \mp jQ_z & \pm jQ_y \\ \pm jQ_z & 1 & \mp jQ_x \\ \mp jQ_y & \pm jQ_x & 1 \end{pmatrix} \quad (5)$$

em que os elementos da matriz dependem da permissividade relativa do material, $\epsilon = \epsilon' - \epsilon''$, e do vetor magneto-óptico de Voigt, $\mathbf{Q} = (Q_x, Q_y, Q_z)$, que é função da frequência da onda e do campo magnético induzido (CAREY; THOMAS, 1974). Para materiais ferromagnéticos e ferrimagnéticos o vetor magneto-óptico de Voigt também pode ser escrito como $\mathbf{Q} = (Q_0 m_x, Q_0 m_y, Q_0 m_z)$, sendo Q_0 a constante magneto-óptica do material e m_x , m_y e m_z são as componentes do vetor magnetização normalizado.

Considerando que a onda incidente no material magnético está no regime de frequências ópticas, em torno do infravermelho, pelas Equações de Maxwell (QIU, Z. Q.; BADER, S. D., 2000), é possível obter as equações de onda para as ondas com polarização s, ortogonal ao plano de incidência, e p, paralela ao plano de incidência. Sendo assim, considerando a base $(\mathbf{e}_s, \mathbf{e}_p, \mathbf{e}_k)$, essas equações têm a forma (QIU, Z. Q.; BADER, S. D., 2000):

$$\left(\frac{\omega^2 \varepsilon}{c^2} - k'^2\right) E_s + \frac{j\omega^2 \varepsilon \mathbf{Q} \cdot \mathbf{e}_k}{c^2} E_p = 0; \quad (6a)$$

$$-\frac{j\omega^2 \varepsilon \mathbf{Q} \cdot \mathbf{e}_k}{c^2} E_s + \left(\frac{\omega^2 \varepsilon}{c^2} - k'^2\right) E_p = 0, \quad (6b)$$

em que k' é o módulo do vetor propagação da onda eletromagnética no meio magnetizado, ω é a frequência angular, c é a velocidade da luz no vácuo, E_s e E_p são os módulos das componentes S e P do campo elétrico. Com isso, pode-se obter os dois modos normais de propagação para o material magnetizado, que são polarizações circulares com

$$\varepsilon_{\pm} = \varepsilon(1 \pm \mathbf{Q} \cdot \mathbf{e}_k), \quad (7)$$

onde o índice (+) para polarização circular à direita e o (-) à esquerda. Além disso, é possível fazer uma aproximação de primeira ordem em $\mathbf{Q}$ na equação (7), já que Q é bem menor que 1; com isso, o resultado em termos de índice de refração é

$$N_{\pm} = N \left(1 \pm \frac{1}{2} \mathbf{Q} \cdot \mathbf{e}_k \right), \quad (8)$$

A constante magneto-óptica de um material pode ser encontrada a partir da sua rotação Faraday. Tendo a magnetização do material apenas na direção de propagação da onda (configuração polar), substituindo a Equação (8) na (4), com $\delta n_B = (N_+ - N_-)/2$, a expressão que descreve o ângulo de rotação Faraday em termos da constante magneto-óptica, Q_0 , do comprimento de onda λ e da magnetização normalizada m , é dada por

$$\phi_B = \frac{\pi d N Q_0 m}{\lambda}. \quad (9)$$

Assumindo a condição do material com magnetização saturada, $m = 1$, e sendo n a parte real do índice de refração e κ o coeficiente de extinção, a constante magneto-óptica do material é dado por

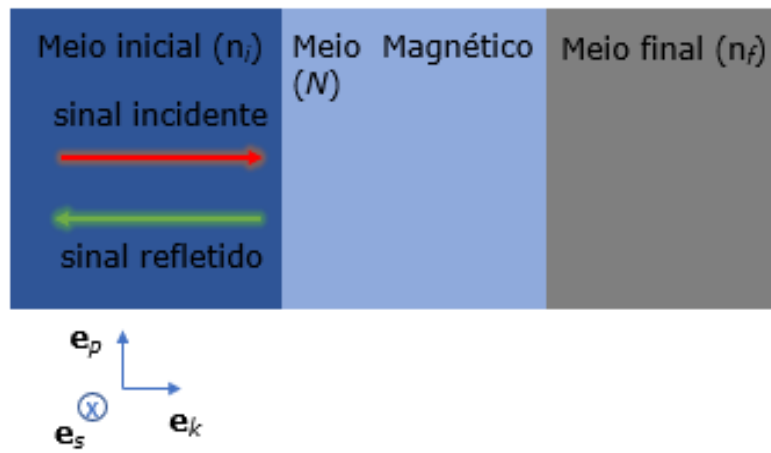
$$Q_0 = \frac{\lambda \phi_B^{\max}}{\pi d} \frac{n}{n^2 + \kappa^2} - j \frac{\lambda \phi_B^{\max}}{\pi d} \frac{\kappa}{n^2 + \kappa^2}, \quad (10)$$

onde $\phi_B^{\max}$ é o ângulo de rotação faraday no material, com espessura d , e magnetização saturada.

3.2.1 Modelo de Fresnel

O formalismo de Fresnel pode ser usado para descrever os campos refletidos e transmitidos numa estrutura, como a mostrada na Figura 13, onde os meios inicial e final são não magnéticos e seus respectivos índices de refração são n_i e n_f . Entre os materiais não magnéticos, é colocada uma camada magnética, cujo índice de refração é N .

Figura 13 - Modelo físico para a estrutura de bulk do transdutor.



Fonte: O Autor, 2023.

Para desenvolver o formalismo de Fresnel, é necessário aplicar as condições de contorno nas interfaces dos meios materiais envolvidos aos campos elétrico e magnético, que compõem as ondas eletromagnéticas incidente, refletida e transmitida na interface. Em meios materiais birrefringentes, definem-se os campos elétricos nos meios materiais inicial e final da seguinte forma (QIU, Z. Q.; BADER, S. D., 2000):

$$\mathbf{P}_i = \begin{pmatrix} E_s^i \\ E_p^i \\ E_s^r \\ E_p^r \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E_s^i \\ E_p^i \\ r_{ss}E_s^i + r_{sp}E_p^i \\ r_{ps}E_s^i + r_{pp}E_p^i \end{pmatrix} \quad (11)$$

e

$$\mathbf{P}_f = \begin{pmatrix} E_s^t \\ E_p^t \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} t_{ss}E_s^i + t_{sp}E_p^i \\ t_{ps}E_s^i + t_{pp}E_p^i \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (12)$$

em que r e t são os coeficientes de Fresnel para reflexão e transmissão da luz, E^i e E^r são os campos elétricos incidente e refletido.

A camada de material magnético, representada na região intermediária da Figura 13, é descrita pela seguinte expressão (QIU, Z. Q.; BADER, S. D., 2000):

$$\mathbf{M} = \mathbf{A}_m^{-1} \mathbf{D}_m \mathbf{A}_m \quad (13)$$

em que $\mathbf{M}$ é uma matriz quadrada de ordem 4 que depende de parâmetros ópticos e magnéticos. Sendo $\mathbf{A}$, a matriz quadrada de contorno do meio material; e $\mathbf{D}$, a matriz quadrada de propagação da luz no meio material.

Considerando a seguinte igualdade:

$$\mathbf{A}_i \mathbf{P}_i = \mathbf{A}_m^{-1} \mathbf{D}_m \mathbf{A}_m \mathbf{A}_f \mathbf{P}_f \quad (14)$$

tem-se que

$$\mathbf{P}_i = \mathbf{T} \mathbf{P}_f \quad (15)$$

onde

$$\mathbf{T} = \mathbf{A}_i^{-1} \mathbf{A}_m^{-1} \mathbf{D}_m \mathbf{A}_m \mathbf{A}_f \equiv \begin{pmatrix} \mathbf{G} & \mathbf{H} \\ \mathbf{I} & \mathbf{J} \end{pmatrix}, \quad (16)$$

e

$$\mathbf{A}_{i,f} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 \\ 0 & -n_{i,f} & 0 & -n_{i,f} \\ n_{i,f} & 0 & -n_{i,f} & 0 \end{pmatrix}. \quad (17)$$

em que $\mathbf{G}$, $\mathbf{H}$, $\mathbf{I}$ e $\mathbf{J}$ são matrizes quadradas de ordem 2, como pode ser observado na Equação (16). Para obter os coeficientes de Fresnel da transmissão e da reflexão, basta fazer uso das matrizes $\mathbf{G}$ e $\mathbf{I}$, de forma que (QIU, Z. Q.; BADER, S. D., 2000)

$$\mathbf{G}^{-1} = \begin{pmatrix} t_{ss} & t_{sp} \\ t_{ps} & t_{pp} \end{pmatrix}; \mathbf{I} \mathbf{G}^{-1} = \begin{pmatrix} r_{ss} & r_{sp} \\ r_{ps} & r_{pp} \end{pmatrix}. \quad (18)$$

Dessa forma, os campos refletidos nas polarizações P e S são obtidos resolvendo a equação matricial

$$\begin{pmatrix} \frac{E_s}{E_p} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_{ss} & r_{sp} \\ r_{ps} & r_{pp} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_0 \sin \delta_{in} \\ E_0 \cos \delta_{in} \end{pmatrix}, \quad (19)$$

onde E_0 e δ_{in} , o módulo e o ângulo de polarização de entrada do campo elétrico. Com isso a reflectância do sinal modulado é dada por

$$R = \left\| \frac{E_s}{E_0} \right\|^2 + \left\| \frac{E_p}{E_0} \right\|^2 = R_s + R_p \quad (20)$$

em que R_s e R_p são as reflectâncias da S e da P, respectivamente.

Atendendo ao propósito deste trabalho, a configuração da magnetização do material magnético é a polar. Portanto, a matriz que configura cada material é descrita por (ZAK et al., 1990)

$$\mathbf{A}^{-1} \mathbf{D} \mathbf{A} = \begin{pmatrix} c & -js\sigma & \frac{Qs}{2N} - \frac{c\sigma}{N} & -j\frac{s}{N} \\ js\sigma & c & j\frac{s}{N} & \frac{Qs}{2N} - \frac{c\sigma}{N} \\ \frac{QNs}{2} + Nc\sigma & jNs & c & -js\sigma \\ -jNs & \frac{QNs}{2} + Nc\sigma & js\sigma & c \end{pmatrix}, \quad (21)$$

em que

$$c = \cos(2\frac{\pi}{\lambda}Nd\alpha_x); s = \sin(2\frac{\pi}{\lambda}Nd\alpha_x); \sigma = \frac{\pi}{\lambda}NQd, \quad (22)$$

onde d é a espessura da camada magnética, e λ é o comprimento de onda da luz. Note que, sem perda de generalidade, para multicamadas magnéticas, basta incluir na Equação (14), tantas vezes quanto o número de camadas, a matriz da Equação (21), respeitando as características de cada material magnético. O código em Matlab utilizado para obter o resultados dessa modelagem é encontrado no Apêndice A desta tese.

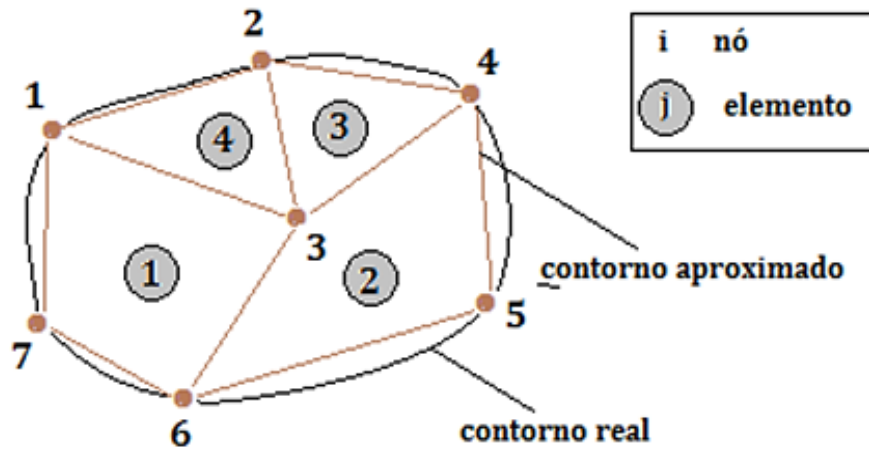
3.2.2 Modelo numérico no comsol multiphysics

O método usado para a modelagem numérica no COMSOL é o método de elementos finitos (MEF), que é utilizado em grande parte dos *softwares* de modelagem de problemas físicos, já que ele se aplica a vários modelos físicos devido à generalidade de seu algoritmo de programação, onde é necessário apenas delimitar

domínios e fornecer condições de contorno e de valores iniciais. Além disso, o MEF se adapta bem a modelos físicos complexos (SADIKU, 2004; POLYCARPOU, 2022).

O MEF envolve a discretização de um domínio geométrico mais complexo em várias partes menores, de geometria simples (POLYCARPOU, 2022). A Figura 14 mostra um exemplo de domínio com geometria irregular, que foi discretizada em um número finito de elementos triangulares e quadrangulares.

Figura 14 - Contorno irregular onde é inserida uma malha (formado por nós e elementos)



Fonte: Shadiku, 2004.

Com o domínio discretizado, é feita uma aproximação para o campo elétrico dentro de cada elemento, onde o campo em toda região é descrito por

$$E(x,y) = \sum_{j=1}^N E_j(x,y) \quad (23)$$

em que N é o número de elementos e E_j é o campo elétrico dentro do j -ésimo elemento.

Em geral, a forma usada para aproximar o campo E_j é por meio da aproximação polinomial, onde são usados os seguintes tipos de elementos (SADIKU, 2004)

$$E_j(x,y) = \begin{cases} a + bx + cy (\text{triangular}); \\ a + bx + cy + dxy (\text{quadrangular}). \end{cases} \quad (24)$$

onde a , b , c e d são constantes. Então é possível obter o campo dentro de um elemento a partir dos nós do elemento, usando a seguinte expressão (SADIKU, 2004):

$$E_j = \sum_{i=1}^M \alpha_i(x,y) E_{ji} , \quad (25)$$

em que M é números de nós em um elemento, se triangular 3 ou 4 se quadrangular, e α_i é a função base associada ao nó i (SADIKU, 2004). Dessa forma é possível conhecer o campo em todo domínio a partir do campo dos nós dos elementos.

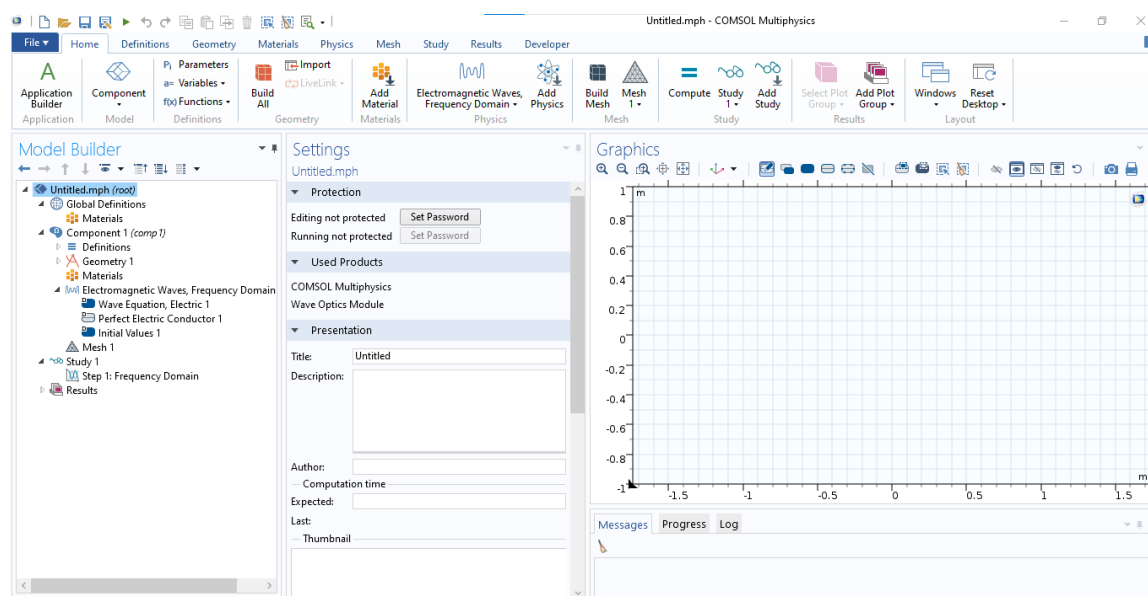
O COMSOL é um *software* cujo seu código fonte é fechado, onde, através de sua interface gráfica, é possibilitado ao usuário: i) escolher a área da física trabalhada; ii) introduzir a geometria do problema; iii) caracterizar os materiais envolvidos na modelagem; iv) manipular as condições iniciais e de contorno da geometria proposta; v) escolher as características da malha traçada na geometria proposta e, por fim, vi) gerar os resultados. A versão do COMSOL utilizada para a modelagem do transdutor estudado neste trabalho foi a 5.2, disponível no Laboratório de Sensores e Instrumentação da UFPE.

Como descrito anteriormente, a modelagem no COMSOL é feita através de uma sequência de passos, que são descritos a seguir:

i) Escolhendo o Módulo de Trabalho:

Ao abrir o programa, o primeiro passo é clicar na opção “*Model Wizard*” e definir a dimensão do espaço para a simulação; em seguida, é escolhida a “física” do seu problema, que no caso deste trabalho é *Electromagnetic Waves, Frequency Domain* (COMSOL, 2015). Então, o usuário será levado a uma janela, como a mostrada na Figura 15.

Figura 15 - Interface do COMSOL para o módulo Electromagnetic Waves, Frequency Domain



Fonte: O Autor, 2023.

Ao escolher o módulo de trabalho o usuário está escolhendo a equação que será resolvida pelo MEF, que no caso é a equação de onda para campos harmônicos (COMSOL, 2015)

$$\nabla \times \mu^{-1}(\nabla \times \mathbf{E}) - k_0^2 \varepsilon \mathbf{E} = 0, \quad (26)$$

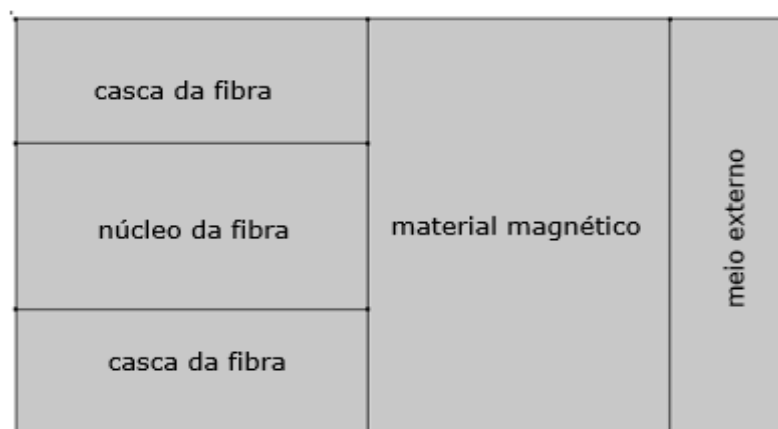
que para o caso de frequência ópticas e quando não há nem fontes nem sorvedouros essa equação pode ser escrita como (COMSOL, 2015)

$$\nabla^2 \mathbf{E} + k_0^2 \varepsilon \mathbf{E} = 0. \quad (27)$$

ii) Desenhando a Geometria do Problema:

A geometria no COMSOL é feita usando as próprias formas geométricas que estão disponíveis na aba “Geometry”. A Figura 16 mostra os domínios do modelo físico para uma estrutura de fibra óptica, com um material magnético na ponta da fibra, e após o meio externo.

Figura 16 - Geometria do modelo físico no COMSOL para estrutura de fibra óptica

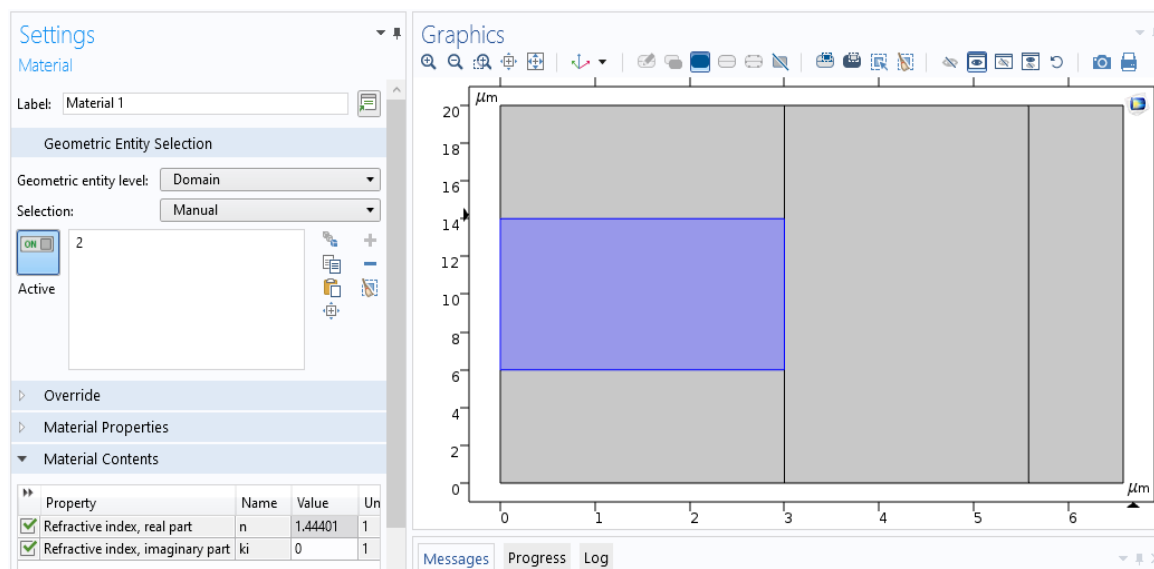


Fonte: O Autor, 2023.

iii) Caracterizando as Regiões Definidas no COMSOL:

No COMSOL, a caracterização das regiões é realizada na aba “Materials”, onde a seleção das regiões é feita selecionando-as separadamente. Como exemplo, a Figura 17 ilustra a caracterização da região azulada, núcleo da fibra, como sílica, por meio de seu índice de refração.

Figura 17 - Caracterização de uma região no COMSOL



Fonte: O Autor, 2023.

A caracterização das regiões referentes aos outros materiais é feita de forma semelhante à da sílica, com exceção do material magnético, onde, devido à anisotropia causada pelo campo magnético, é feito um procedimento diferente. Utilizando os comandos “Physics”>“Boundaries”>“Wave Equation, Electric” abrirá uma janela de configurações, nessa janela há uma lista referente a “Electric Displacement field model”, nela basta selecionar o modo “Dielectric Loss”, onde é aberta a opção para o usuário escolher a forma da permissividade relativa para o material, que, no caso deste estudo, é o tensor da Equação (5). Por fim, é selecionada a região onde se quer relacionar o tensor permissividade.

iv) Gerando as Condições de Valor Inicial e de Contorno:

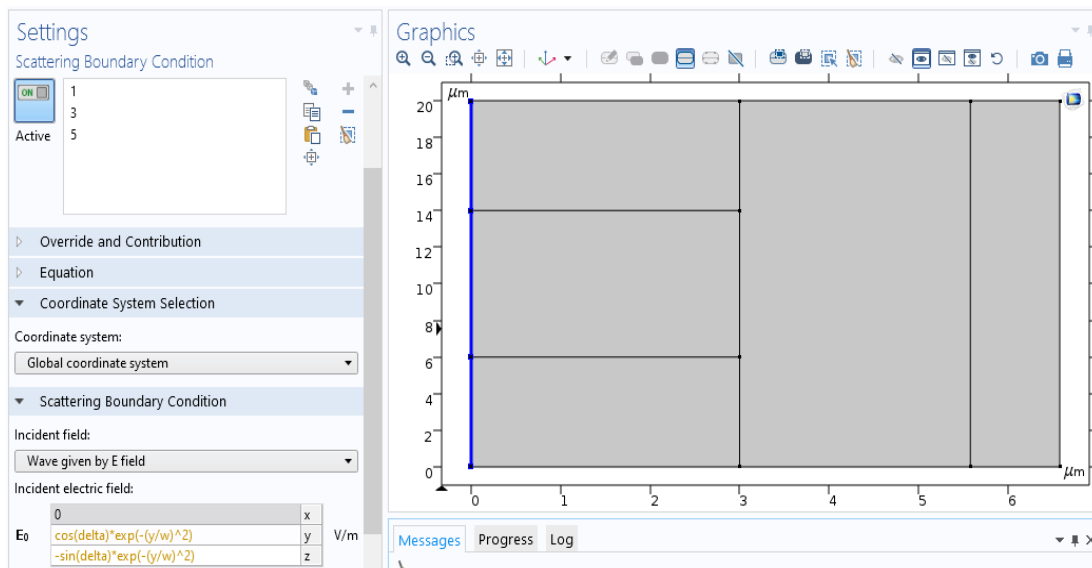
Para o modelo proposto, basta entrar com a condição de valor inicial para a amplitude do campo elétrico da onda incidente. Isso é feito na aba “Physics”>“Boundaries”> “Scattering Boundary Condition”. Em seguida, na janela “settings”, pode ser atribuído amplitudes para o campo elétrico nas três dimensões do plano cartesiano e a sua direção de propagação.

A excitação da onda eletromagnética na estrutura de fibra óptica foi feita utilizando um feixe gaussiano, que é uma boa aproximação para o modo fundamental que se propaga em uma fibra monomodo (MARCUSE, 1978). O campo elétrico que é excitado na estrutura de fibra óptica, para o modelo 2D no COMSOL, foi

$$E_i = \begin{pmatrix} E_x^i \\ E_y^i \\ E_z^i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ \cos \delta_{in} e^{-(y/w_0)^2} \\ -\sin \delta_{in} e^{-(y/w_0)^2} \end{pmatrix} \quad (28)$$

onde E_x^i , E_y^i , E_z^i , são as componente x , y e z do campo elétrico; o que leva as relações $E_y^i = E_p^i$ e $E_z^i = -E_s^i$, δ_{in} é o ângulo de polarização tal qual descrito na Seção 3.1, w_0 é a largura do feixe; que nas simulações é considerado como igual ao raio do núcleo da fibra óptica. Para um estrutura 3D, a variável y na Equação (28) é trocada pela coordenada polar $r = \sqrt{y^2 + z^2}$. A Figura 18 mostra a aplicação da excitação na interface da fibra óptica.

Figura 18 - Condição para o espalhamento da onda no domínio do modelo



Fonte: O Autor, 2023.

v) Gerando a Malha:

O COMSOL permite que a malha seja personalizada, ou seja, o usuário pode escolher a malha que seja mais eficiente para seu problema específico. Para esse estudo, uma malha quadrangular se adequa bem, devido a geometria retangular do modelo. Esse tipo de malha pode ser traçado selecionando “Mesh”>“Mapped”, onde é selecionado todo o domínio, para, em seguida, aplicar a malha. Além disso, vale ressaltar a importância de configurar uma malha com tamanho adequado. Como descrito no início desta seção, o MEF pressupõe que o campo dentro de cada elemento seja uniforme. Assim, é essencial que os elementos possuam dimensões menores que o comprimento da onda incidente. No caso dessa modelagem, a

dimensão máxima de cada elemento é 40 vezes menor do que o comprimento de onda da luz incidente.

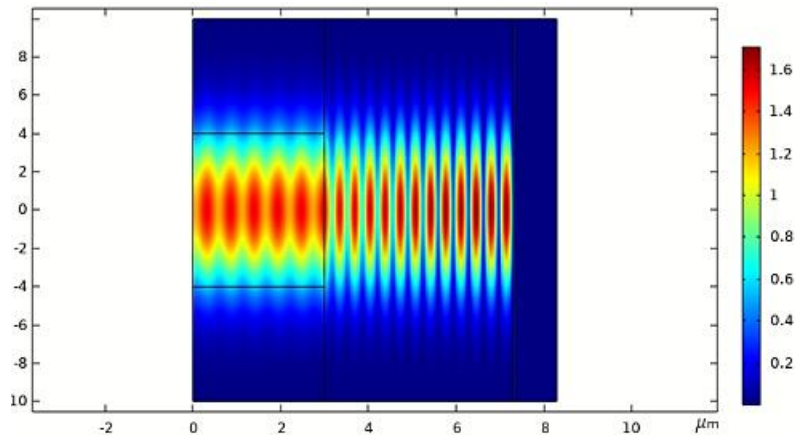
vi) Gerando os Resultados:

Por fim, para geração dos resultados no COMSOL, basta informar ao programa a execução dos cálculos nos comandos “Study”>“Compute”. Assim, na aba “Results”, é possível obter os resultados desejados. A Figura 19 apresenta um desses resultados, que trata do *plot* superficial da norma do campo elétrico distribuído em todo domínio. A partir desses valores de campo fornecidos pelo COMSOL, é possível encontrar a reflectância das ondas S e P pelas equações:

$$R_s = \frac{\int \|E_z - E_z^i\|^2 dz}{\int \|E^i\|^2 dz}; \quad (29a)$$

$$R_p = \frac{\int \|E_y - E_y^i\|^2 dy}{\int \|E^i\|^2 dy}. \quad (29b)$$

Figura 19 - Plot de superfície da norma do campo elétrico no domínio do transdutor, para modelo de fibra



Fonte: O Autor, 2023.

3.3 CONSIDERAÇÕES ADOTADAS PARA REALIZAÇÃO DA MODELAGEM

Com relação aos materiais utilizados nas simulações, foram estudadas duas estruturas, que são denominadas de tipo I e tipo II. A estrutura tipo I faz uso apenas do efeito Kerr magneto-óptico, sendo sua composição Fibra/Ferro/Ar. Enquanto a estrutura tipo II é baseada principalmente no efeito Faraday magneto-óptico, pois o material magnético usado é o Ce:YIG que é quase transparente para a faixa de

frequências ópticas, e possui uma boa resposta magneto-óptica nessa faixa de frequências (ONBASLI *et al.*, 2016). Goto et al (GOTO; ONBAŞLÒ; ROSS, 2012), em seu trabalho experimental, produziu amostras de Ce:YIG com rotação Faraday de -1100 °/cm, e índice de refração de $2,25 + j8,3 \times 10^{-5}$. Dessa forma, a composição para o transdutor tipo II é Fibra/Ce:YIG/Alumínio.

A constante magneto-óptica do ferro foi encontrada no trabalho Carey e Thomas (CAREY; THOMAS, 1974), enquanto a do Ce:YIG foi calculada através da Equação (10), utilizando os parâmetros de rotação Faraday e índice de refração das amostras produzidas por Goto et al. (GOTO; ONBAŞLÒ; ROSS, 2012). Esses parâmetros juntamente com outros utilizados nas simulações estão na Tabela 1.

Tabela 1 - Parâmetros usados nas simulações

Descrição	Parâmetro	Valor
Comprimento de onda	λ	1550 nm
Índice de refração do núcleo da fibra óptica (MÉNDEZ; MORSE, 2007)	n_{core}	1,444
Índice de refração da casca da fibra óptica (MÉNDEZ; MORSE, 2007)	n_{clad}	1,438
Índice de refração do Fe (RAKIĆ <i>et al.</i> , 1998)	n_{fe}	$3,62 + j5,56$
Índice de refração do Py (Tikuišis <i>et al.</i> , 2017)	n_{py}	$4,428 + j6,945$
Índice de refração do Ce:YIG (GOTO; ONBAŞLÒ; ROSS, 2012)	$n_{Ce:YIG}$	$2,25 + j8,3 \times 10^{-5}$
Índice de refração do Al (RAKIĆ <i>et al.</i> , 1998)	n_{Al}	$1,5137 + j15,234$
Constante magneto-óptica do Fe (CAREY; THOMAS, 1974)	Q_0^{Fe}	$0,051 - j0,063$
Rotação Faraday por centímetro do Ce:YIG (GOTO; ONBAŞLÒ; ROSS, 2012)	$\phi_B^{Ce:YIG}$	-1100°/cm
Constante magneto-óptica do Ce:YIG	$Q_0^{Ce:YIG}$	$-0,024 + j8,9 \times 10^{-7}$
Comprimento da fibra óptica	L	3 μ m
Espessura da camada do meio externo	L_{ext}	1 μ m
Diâmetro do núcleo da fibra óptica	D_{core}	8 μ m
Diâmetro da casca da fibra óptica	D_{clad}	20 μ m

Fonte: O Autor 2023.

Outro objeto de estudo desta tese foi a influência que a temperatura causa na resposta do sensor que utiliza Ce:YIG. O efeito da temperatura pode ser incluído no modelo computacional através da taxa de variação do índice de refração de cada material em relação a temperatura, dn/dT , e da variação da constante magneto-óptica do Ce:YIG, que pode ser calculada utilizando a taxa de variação da rotação Faraday do Ce:YIG em relação a temperatura, $d\phi_B/dT$. Para a rotação Faraday do Ce:YIG tem-se a taxa $d\phi_B/dT = 13^\circ/\text{cm}/^\circ\text{C}$ (SHOJI; NEMOTO; MIZUMOTO, 2014), e para os índices de refração dos materiais $dn/dT = 10^{-5}$, 2.5×10^{-4} e $10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, respectivamente para SiO_2 , Ce:YIG e Al (SHOJI; NEMOTO; MIZUMOTO, 2014; RAKIĆ et al., 1998).

4 RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS

Neste Capítulo serão abordados os resultados obtidos através das modelagens descritas no Capítulo 3. Na Seção 4.1 são mostrados os resultados para o transdutor tipo I, Subseção 4.1.1, e para o transdutor tipo II, Subseção 4.1.2. Ainda na Subseção 4.1.2 é abordada a caracterização para diferentes faixas de operação do sensor. Já na Seção 4.2, estão os resultados da influência da temperatura na modulação do sinal, sendo a Subseção 4.2.1 voltada para otimização do sensor de acordo com a temperatura.

4.1 ELABORAÇÃO DO TRANSDUTOR PARA MONITORAMENTO DO CAMPO MAGNÉTICO

Nesta seção, são mostrados os resultados dos estudos para os dois tipos de transdutores propostos. Sendo para o sensor tipo I, baseado no efeito Kerr, o ferro escolhido como material magnético, pois o ferro tem uma boa resposta magnética, com um campo magnético de saturação podendo chegar a valores grandes (KRINCHIK; ARTEMJEV, 1968), possibilitando uma ampla faixa de operação para o sensor.

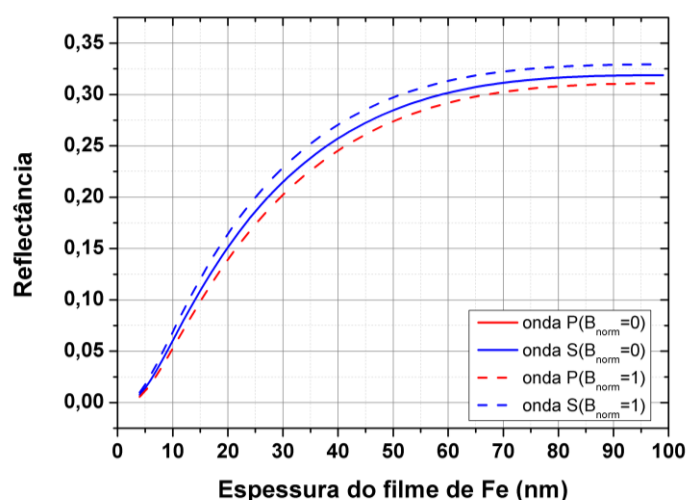
Já o sensor tipo II faz uso do Ce:YIG que é um material ferrimagnético, e também tem uma boa resposta magneto-óptica na faixa de frequência ópticas, além de ter uma absorção muito pequena, o que torna um excelente material para o efeito Faraday magneto-óptico, permitindo que essa estrutura tenha uma boa sensibilidade ao campo magnético. Nessa estrutura, uma camada de alumínio é posta após o Ce:YIG com intuito de aumentar a reflectância do sinal de volta para a fibra óptica.

4.1.1 Transdutor tipo I - filme de ferro

A Figura 20 mostra a refletância em função da espessura do filme de Fe, obtida para as ondas de polarização P e S, como resultado do sinal óptico incidente polarizado, com $\delta_{in} = 45^\circ$. A refletância dessas ondas é obtida separadamente simulando um polarizador de 0° para selecionar a onda S e outro a 90° para selecionar a onda P, essas curvas de reflectância foram geradas utilizando o modelo analítico.

Como pode ser visto, na ausência de um campo magnético, as curvas de refletância são idênticas para as polarizações S e P (as curvas são sobrepostas na Figura 20). Na presença de um campo magnético de saturação de Fe, é possível diferenciar a refletância das ondas S e P. A partir desses resultados, foi possível escolher o valor de 50 nm para a espessura do filme de Fe na configuração do sensor, uma vez que já apresenta boa refletância e uma maior diferença de refletância entre as ondas S e P.

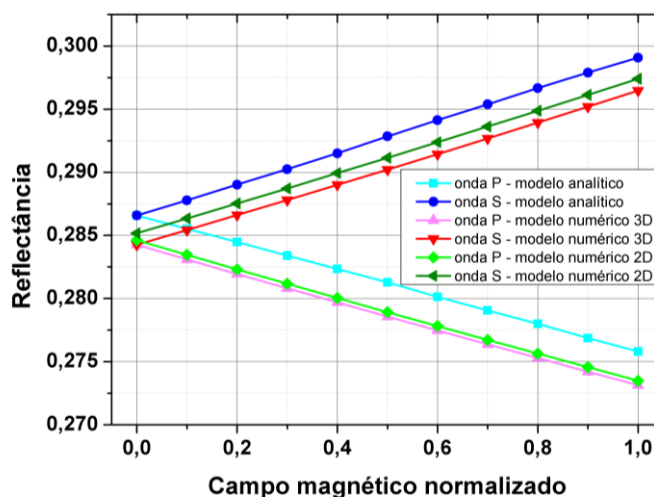
Figura 20 - refletância em função da espessura do filme de Fe



Fonte: o Autor, 2023.

A refletância para as ondas P e S em função do campo magnético normalizado pelo campo de saturação do Fe, para a camada de Fe de 50 nm, é mostrada na Figura 21. As curvas foram obtidas a partir do modelo analítico implementado no MATLAB, para a estrutura *bulk*, e do modelo numérico construído no COMSOL, para os modelos 2D e 3D, da estrutura do transdutor com fibra óptica. Como pode ser visto, o aumento do campo magnético provoca alterações na terceira casa decimal da refletância, e apresenta um comportamento linear. Isso ocorre porque o efeito Kerr magneto-óptico é o único que ocorre nesta configuração. Como o ângulo de rotação de Kerr é da ordem de miliradianos (ZAK et al., 1990), esse comportamento de pequena variação da refletância em função do campo magnético é esperado. As curvas de refletância obtidas da estrutura do sensor de fibra óptica com o modelo numérico, são compatíveis com as curvas de refletância da estrutura *bulk* obtidas com o modelo analítico.

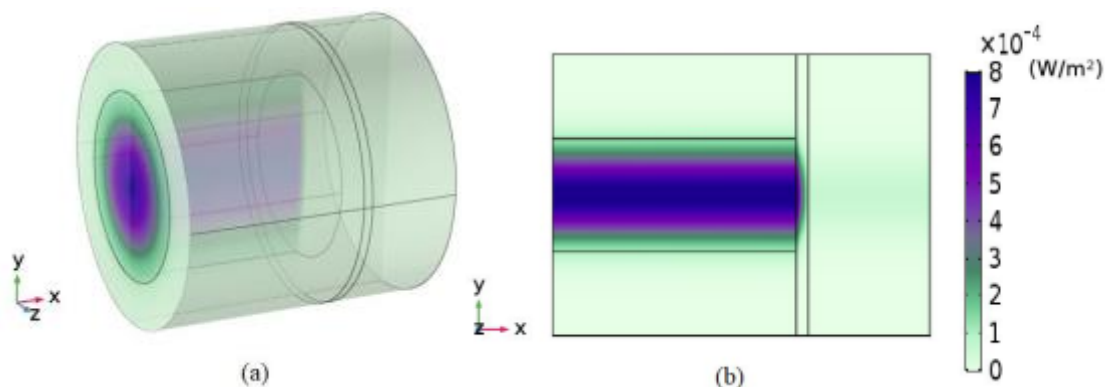
Figura 21 - reflectância em função do campo magnético, para 50 nm de espessura do filme de Fe



Fonte: O Autor, 2023.

Os resultados da Figura 21 mostram uma boa concordância entre os modelos de transdutores 2D, 3D e analítico, com menos de 1% de diferença. Essa pequena diferença se deve às diferentes estruturas utilizadas, fibra óptica nos modelos numéricos e sistema multicamadas semi-infinito no modelo analítico. A Figura 22 apresenta a distribuição da potência óptica propagante na fibra, no modelo 3D (Figura 22a) e no modelo 2D (Figura 22b). Essa concordância observada indica que a geometria 2D utilizada para representar a seção longitudinal de uma fibra óptica é uma boa aproximação. Assim, os demais resultados apresentados nesta tese foram obtidos utilizando o modelo 2D apenas, devido à sua simplicidade, maior velocidade e menor necessidade de RAM do computador.

Figura 22- Distribuição de potência óptica para os modelos (a) 3D e (b) 2D de fibra, para o transdutor Tipo I

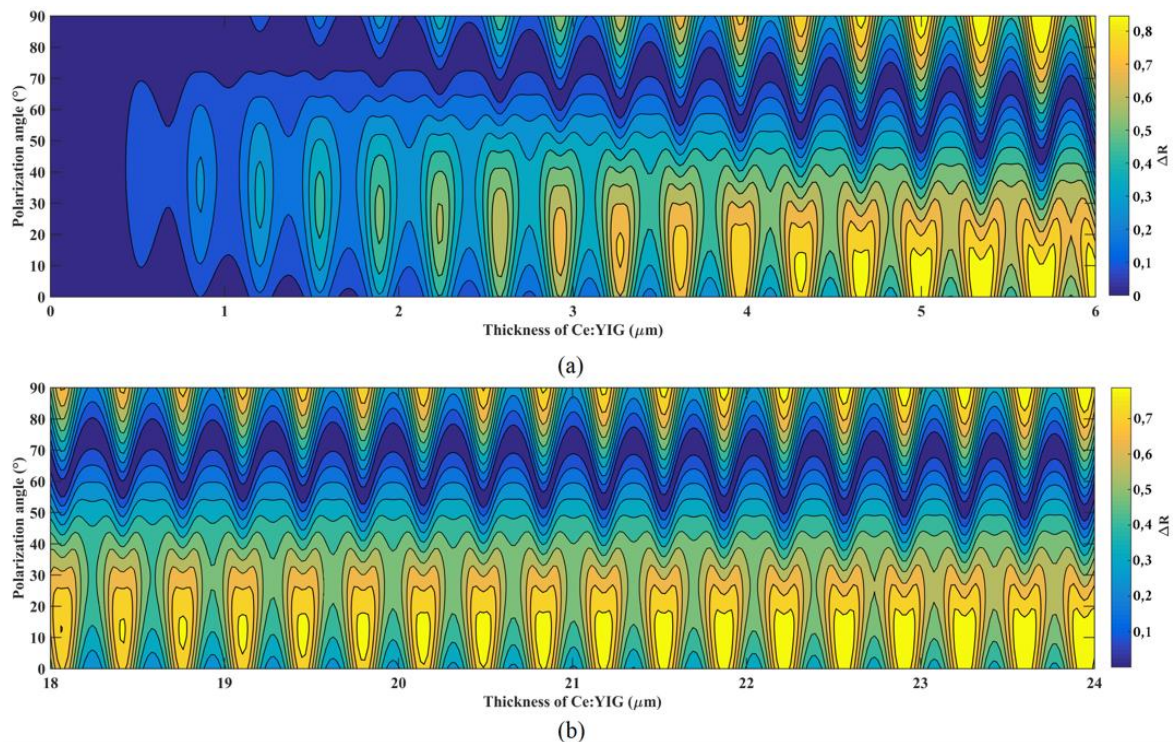


Fonte: O Autor, 2023.

4.1.2 Transdutor tipo II - camada de Ce:YIG

No transdutor Tipo II, os efeitos Kerr e Faraday causam a rotação da polarização do sinal óptico, e há também o efeito de cavidade (Etalon), que interfere na modulação da amplitude do sinal. Assim, para otimizar a sensibilidade do sensor, é necessária uma combinação específica do ângulo de polarização de entrada do sinal óptico e a espessura do material magnético. A análise da configuração para obter a melhor sensibilidade ao longo de toda a faixa de operação do sensor, é feita através do gráfico de superfícies de nível da Figura 23. Nesse gráfico, o eixo horizontal corresponde à espessura do material magnético e o eixo vertical ao ângulo de polarização, δ_{in} , do sinal óptico de entrada. As superfícies de nível correspondem à diferença entre a refletância para um campo magnético de valor B , $R(B)$, e a refletância para um campo magnético nulo R_0 , sendo na Figura 23a $B = B_{sat}$, que é o campo de saturação do Ce: YIG (0,2T) (GOTO; ONBASLÒ; ROSS, 2012), e na Figura 23b $B = 40 \text{ mT}$.

Figura 23 - Curvas de nível de ΔR para uma variação de campo magnético nulo até (a) 200 mT (saturação) e (b) 40 mT

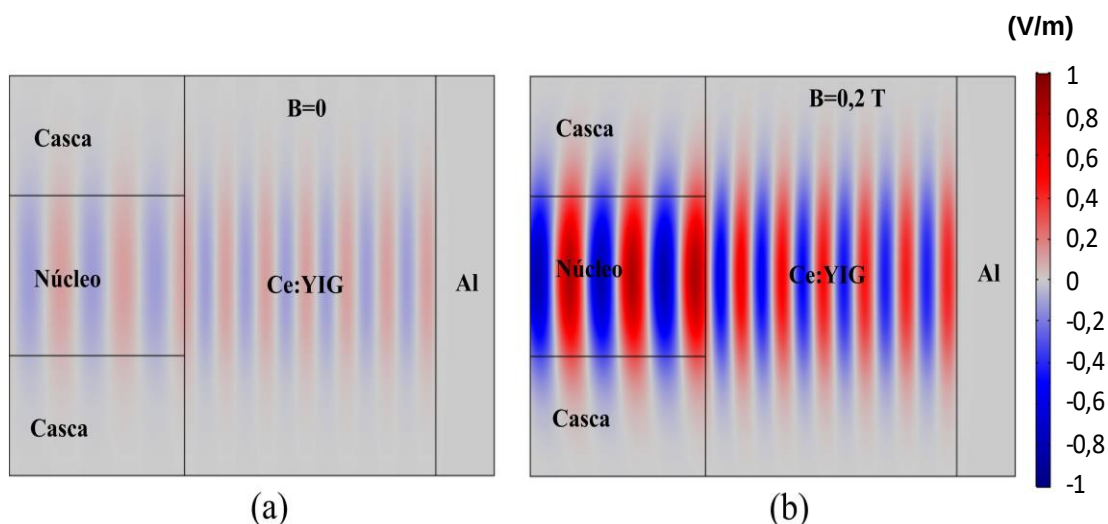


Fonte: O Autor, 2023.

Pode-se notar a partir da Figura 23 que várias regiões apresentam variação de refletância máxima, o que implica em regiões com maior sensibilidade do sensor, dependendo do ângulo de polarização da luz incidente e da espessura do material. Analisando as regiões do gráfico na Figura 23a, que é para a faixa operacional de campo magnético nulo até o valor de saturação do Ce: YIG (0 a 0,2 T), pode-se selecionar o ângulo de polarização de 10° do sinal óptico de entrada e $4,3 \mu\text{m}$ de Ce:YIG. Essa região foi selecionada por causa de sua alta sensibilidade, e a boa linearidade do sinal. O resultado da modulação do sinal óptico para esta configuração é mostrado na Figura 24.

A distribuição do campo elétrico da polarização P é mostrada na Figura 24, para a estrutura do Tipo II em duas situações: campo magnético nulo (Figura 24a) e para campo magnético de 0,2 T (Figura 24b). Essa distribuição do campo elétrico é o resultado da onda P, transmitida e refletida em cada meio da estrutura. Com isso, é possível notar que, na presença do campo magnético, a componente P tem maior intensidade devido ao efeito de rotação de polarização da luz que se propaga no Ce:YIG. Além disso, na Figura 24, observa-se que parte do sinal óptico refletido é espalhado para o revestimento.

Figura 24 - Distribuição da componente P do campo elétrico ao longo das interfaces de fibra/Ce:YIG/alumínio para campo magnético (a) nulo e (b) de saturação



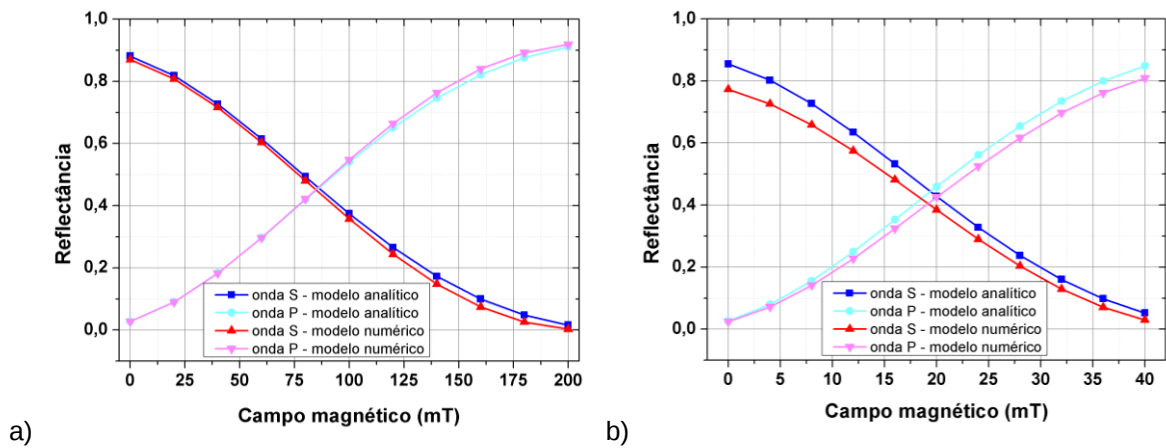
Fonte: O Autor, 2023.

As curvas da Figura 25a mostram a modulação das ondas S e P para a estrutura *bulk* do sistema multicamadas (modelo analítico) e para a estrutura de fibra óptica (modelo numérico). As escolhas feitas para configuração do dispositivo (ângulo

de polarização e espessura do material), que gerou os resultados da Figura 25a, são as que otimizam o sensor para a faixa de 0 a 0,2 T do campo magnético.

No entanto, pode-se estar interessado em uma faixa mais estreita de campo magnético, por exemplo, uma região sob a ação de um campo magnético de apenas 40 mT, no máximo. Nesse caso, haverá outra configuração para otimizar o sensor. Para encontrar essa configuração, é gerado o gráfico de superfície da Figura 23b, obtido para uma diferença $\Delta R = R(B) - R_0$, com $B = 40$ mT. Através da Figura 23b, a configuração do sensor é escolhida para a faixa de operação de 0 a 40 mT, onde a polarização do sinal óptico de entrada é de 10° e a espessura de Ce: YIG $19,11 \mu\text{m}$. Com essa configuração, a modulação das ondas P e S para as estruturas de fibra óptica e *bulk* foram obtidas, e os resultados são mostrados na Figura 25b.

Figura 25 - Curvas de reflectância para as ondas P e S obtidas pelo modelo analítico (estrutura de bulk) e pelo modelo numérico (estrutura de fibra óptica) como função do campo magnético (a) até a saturação (com $4,3 \mu\text{m}$ de Ce:YIG) e (b) longe da saturação (com $19,11 \mu\text{m}$ de Ce:YIG) do material magnético



Fonte: O Autor, 2023.

A partir da análise da reflectância em função do campo magnético, obtém-se a sensibilidade do sensor, S_B , que é definida como

$$S_B = \frac{\Delta R}{\Delta B} \quad (30)$$

onde ΔR é a variação na reflectância como resultado da variação ΔB do campo magnético. As sensibilidades das ondas S e P da estrutura em *bulk* (modelo analítico), e da estrutura de fibra óptica (modelo numérico) são apresentadas na Tabela 2. Observe que os valores de sensibilidade para o modelo de fibra óptica são semelhantes aos valores obtidos para o modelo em *bulk*, o que mostra uma boa concordância dos modelos.

Tabela 2 - Sensibilidades para transdutor Tipo II para diferentes faixas de operação

Faixa de operação	Modelo/Estrutura	Componente	Sensibilidade (T^{-1})
0 - 200 mT	Numérico/fibra óptica	onda P	4,459
		onda S	-4,330
	análítico/bulk	onda P	4,417
		onda S	-4,326
0 – 40 mT	Numérico/fibra óptica	onda P	19,627
		onda S	-18,592
	análítico/bulk	onda P	20,535
		onda S	-20,075

Fonte: O Autor, 2023.

As sensibilidades das ondas S e P da configuração com faixa de campo de 0 – 40 mT são maiores do que a configuração anterior, porque agora toda a variação da refletância está restrita a uma faixa menor de variação do campo magnético. Nessa configuração, os valores de sensibilidade para o modelo de fibra óptica se aproximam em 95,58% para a onda P e 92,61% para a onda S dos valores obtidos pelo modelo *bulk*. A maior diferença nas refletâncias mostrada na Figura 25b, em comparação com as obtidas na configuração anterior (para até 0,2 T, mostrada na Figura 25a), pode ser devido à maior espessura do material magnético. Com um material mais espesso, há uma maior dispersão durante a propagação do sinal óptico em Ce: YIG, e menor acoplamento do sinal óptico refletido no núcleo da fibra óptica. Apenas o modelo numérico é sensível a esse efeito, já que só ele considera a estrutura de fibra.

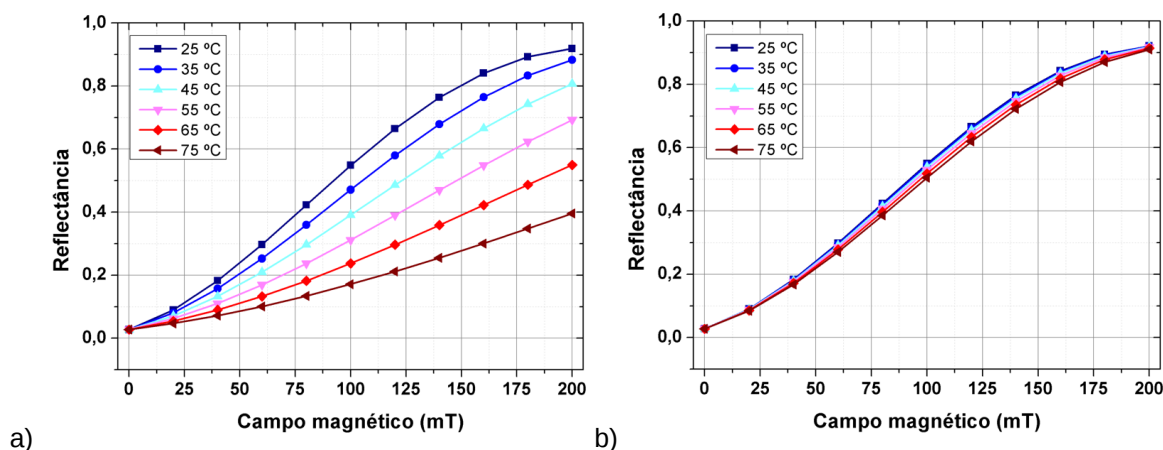
4.2 EFEITOS DE TEMPERATURA NA MODULAÇÃO DO SINAL

O Ce:YIG apresenta boa resposta magneto-óptica, o que possibilita também boa sensibilidade ao sensor (GOTO; ONBAŞLÖ; ROSS, 2012). No entanto, a resposta magneto-óptica do Ce:YIG é influenciada pela temperatura (GOTO; ONBAŞLÖ; ROSS, 2012). Sendo assim, os resultados obtidos na Figura 25a foram gerados considerando que o transdutor está em temperatura ambiente (25 °C). Contudo, existem situações em que o sensor pode estar sob variações consideráveis de temperatura ao longo de um dia, como, por exemplo, no interior de um transformador

de potência. Logo, é necessário saber como a temperatura afeta a modulação do sinal óptico.

O efeito da temperatura pode ser incluído no modelo computacional através da taxa de variação do índice de refração de cada material, e da resposta magneto-óptica do material em relação à temperatura, como descrito na Seção 3.3. Esse efeito da temperatura no sinal óptico é apresentado na Figure 26a, onde é observada a curva de reflectância da onda P para o modelo de fibra óptica. Através dos resultados apresentados na figura, é notada uma forte influência da temperatura na resposta do sinal ao campo magnético.

Figura 26 - Curvas de Reflectância para onda P considerando o efeito da temperatura na (a) resposta magneto-óptica e (b) apenas no índice de refração.



Fonte: O Autor 2023

A fim de observar a resposta puramente óptica, do índice de refração no efeito de etalon, foi gerado o resultado da Figura 26b, onde se observa a pouca variação desse efeito com a temperatura, já que as curvas estão quase sobrepostas. O motivo para esse efeito estar interferindo pouco na modulação do sinal pode ser entendido através da Figura 23a, uma vez que a configuração de ângulo de polarização e espessura do Ce:YIG foi escolhida de forma a cair no centro de uma curva de nível do *plot* da figura. Assim, a pequena mudança no índice de refração, produz uma mudança desprezível no nível de reflectância do sinal.

Depois de determinada as especificações para o transdutor, a reflectância se torna uma função da Temperatura e do campo magnético, $R(B, T)$. Então, utilizando

os resultados da Figura 26a, é possível mensurar o quanto o sistema é sensível à variações de campo e temperatura, sendo a sensibilidade ao campo magnético

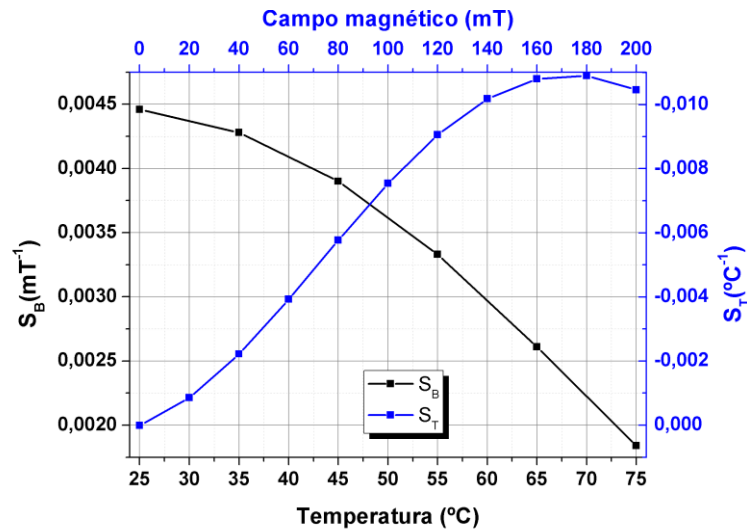
$$S_B = \frac{R(B_{sat}, T) - R_0}{B_{sat}} \quad (31)$$

e a sensibilidade a temperatura,

$$S_T = \frac{R(B, T_2) - R(B, T_1)}{T_2 - T_1} \quad (32)$$

onde T_1 e T_2 são dois valores de temperatura que definem um intervalo. Assim, a sensibilidade ao campo magnético é variável com a temperatura da região sensora, como também, a sensibilidade à temperatura varia com o campo magnético sobre a região. Esses comportamentos das sensibilidades são ilustrados na Figura 27, considerando o intervalo de temperatura de 25 – 75 °C.

Figura 27 – Sensibilidades em relação ao campo magnético em função da temperatura na região de detecção (S_B), curva e eixos em preto, e à temperatura em função do campo magnético (S_T), curva e eixos em azul



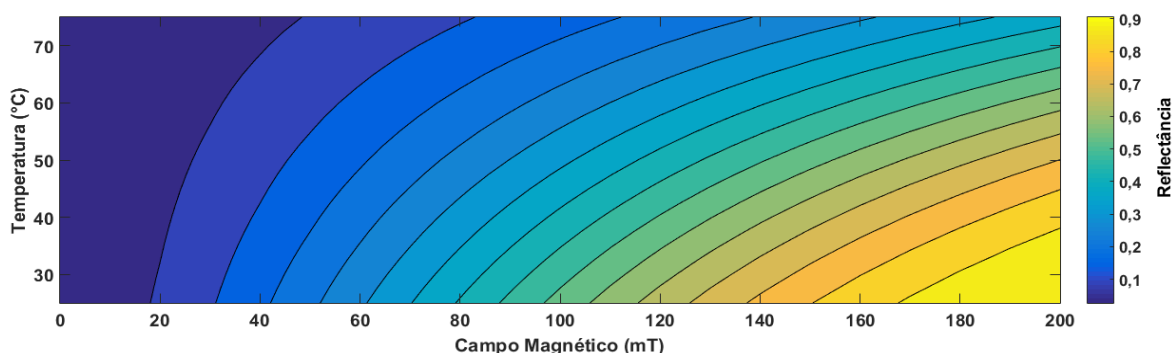
Fonte: O Autor, 2023.

De acordo com a Figura 27, é observada uma queda de 45% da S_B , quando a temperatura de operação do sensor é 50 °C maior em relação à temperatura ambiente (25 °C), o que mostra uma acentuada diminuição da sensibilidade ao campo magnético quando a temperatura aumenta. Além disso, também é observado o comportamento da S_T , em que, a partir de 70 mT, aponta que a modulação do sinal é mais sensível a variações de temperatura da ordem de 1 °C do que a variações de 1 mT de campo, já que para campos acima de 70 mT, S_T tem um valor em módulo maior que 0,0045 °C⁻¹, enquanto que S_B tem um valor máximo de 0,00446 mT⁻¹.

A análise de como a temperatura interfere na medida de campo pode ser feita através da relação entre as sensibilidades S_T e S_B , como exemplo, se o sensor está operando em uma temperatura de 55 °C, e sob a ação de um campo de 160 mT, a razão S_T sobre S_B fornece um valor de -3,27 mT/°C, o que significa que um aumento de 10°C na temperatura, equivale a uma variação de -32,7 mT na medida do campo.

Uma síntese dos resultados obtidos para essa estrutura do sensor é apresentada na Figura 28, que mostra um *plot* das curvas de nível para a reflectância da onda P. Nessa figura, é possível observar como a temperatura afeta pouco a resposta do sensor, quando ele está atuando em campos baixos, como também, a sensibilidade ao campo é bem maior quando está atuando em temperaturas próximas à ambiente.

Figura 28 - Curvas de nível para reflectância da onda P

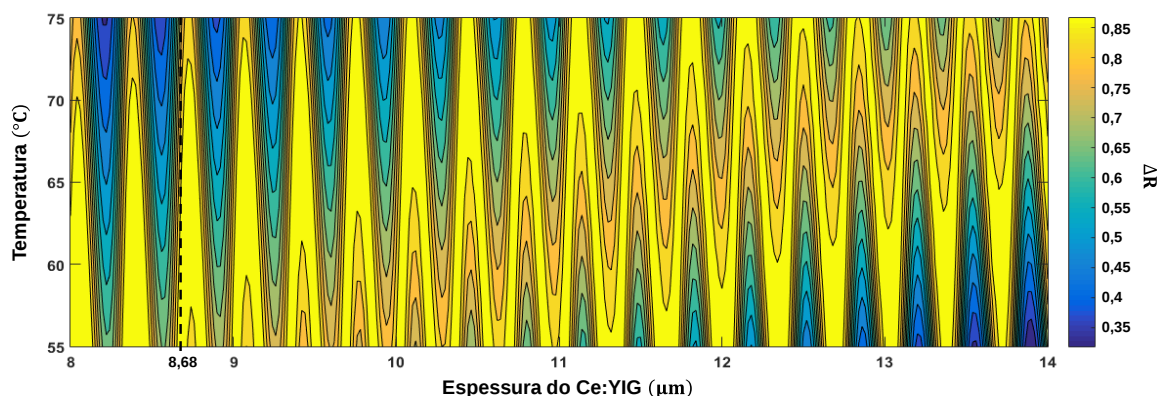


Fonte: O Autor, 2023.

4.2.1 Otimização do transdutor para temperaturas altas

Considerando a aplicação de medição de campos magnéticos em ambientes com temperaturas elevadas e variadas, tal como em transformadores de potência, é necessário que seja feita uma caracterização do sensor a fim de otimizar o sinal para essas condições. Isso pode ser feito através da análise de curva de nível semelhante a Figura 23. No entanto, é preciso analisar o comportamento de ΔR com relação à temperatura e a espessura do filme de Ce:YIG, esse resultado está na Figura 29, para uma faixa de temperatura de 55 à 75 °C. O objetivo desse gráfico é permitir a escolha de uma espessura para o filme de Ce:YIG que forneça alta variação de reflectância com o campo magnético, e mínima com a temperatura. Como ilustrado na figura, essa espessura foi de 8,68 μm .

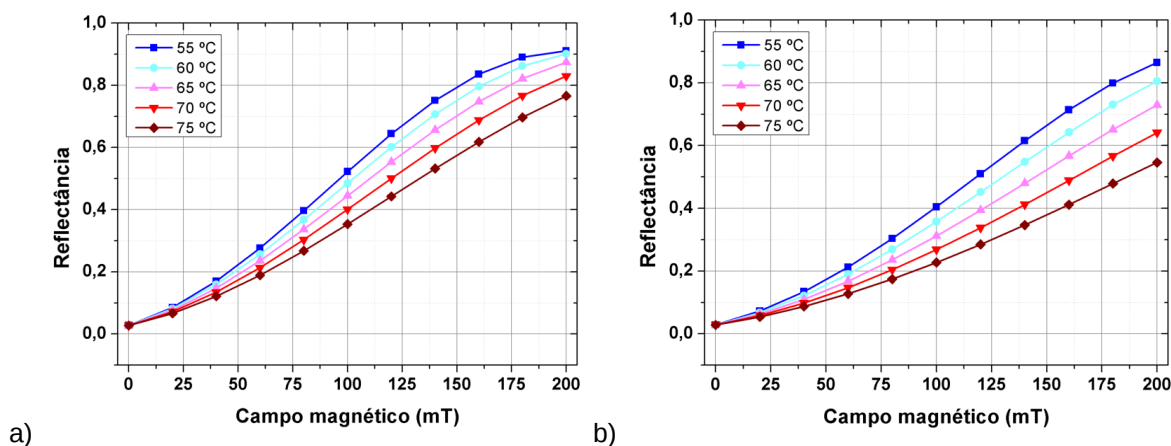
Figura 29 - Curvas de nível de ΔR para uma variação de campo magnético nulo até o campo de saturação do Ce:YIG



Fonte: O Autor, 2023.

Então, com essa nova caracterização do transdutor, sendo a polarização da onda incidente 10° e a espessura do Ce:YIG $8,68 \mu\text{m}$, foram gerados os resultados da Figura 30a, que mostra a reflectância da onda P em função do campo para temperaturas na faixa de $55\text{--}75^\circ\text{C}$. Para analisar o efeito do etalon nessa faixa de temperatura, foi gerado o gráfico da Figura 30b, nesse resultado a dependência do índice de refração dos materiais com temperatura não foi considerada. Comparando os gráficos da Figura 30, é observado que o gráfico que considera a alteração dos índices de refração com a temperatura, tem suas curvas mais próximas umas das outras, como também possuem variações de reflectância maiores. Sendo assim, o efeito de etalon pode ser combinado com o efeito magneto-óptico, a fim de obter um melhor resultado para a modulação do sinal.

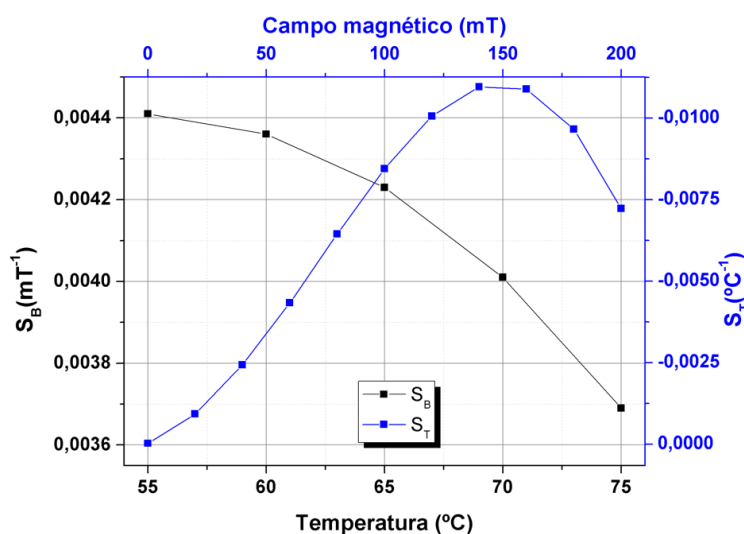
Figura 30 - Curvas de Reflectância para onda P considerando o efeito da temperatura na (a) resposta magneto-óptica e (b) apenas no índice de refração



Fonte: O Autor, 2023.

Utilizando os resultados da Figura 30a, são calculadas as sensibilidades ao campo e à temperatura, de acordo com as Equações (31) e (32), que são mostradas na Figura 31. Comparando esses resultados de sensibilidade com os da Figura 27, tem-se que a sensibilidade à temperatura não tem grande alteração. No entanto, a sensibilidade ao campo é aumentada em 32,43% para uma temperatura de 55°C, e até 100,54% para 75°C. Calculando-se a sensibilidade cruzada de S_T Sobre S_B , com as condições de temperatura de 55 °C, e sob a ação de um campo de 160 mT, é obtido um valor de -2,47 mT/°C.

Figura 31 - Sensibilidades em relação ao campo magnético em função da temperatura na região de detecção (S_B), curva e eixos em preto, e à temperatura em função do campo magnético (S_T), curva e eixos em azul, para uma estrutura otimizada para atuar sob 55-75 °C



Fonte: O Autor, 2023.

A partir dos resultados apresentados nesta seção e na Seção 4.1, é mostrado que, dependendo da aplicação e do local onde o sensor será empregado, é possível projetar o transdutor a fim de otimizar o sinal para uma determinada faixa de operação de campo magnético e faixa de variação de temperatura.

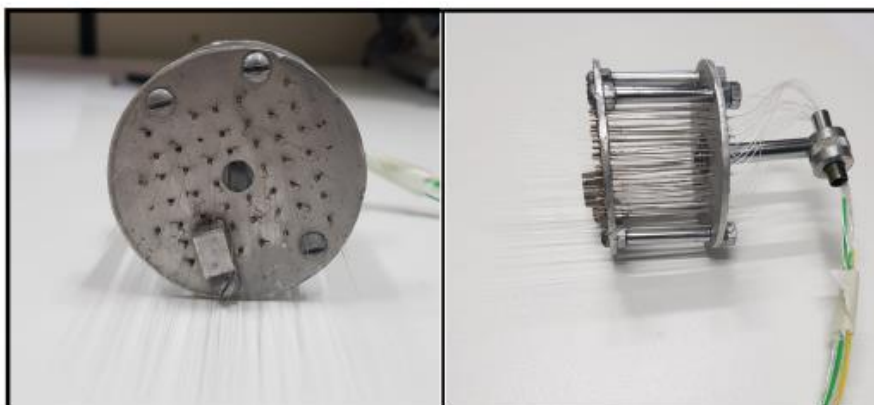
5 SISTEMA SENSOR DE CAMPO MAGNÉTICO

Este capítulo é dedicado à parte experimental da construção do sistema sensor. Na Seção 5.1, é mostrado o processo para preparação dos transdutores com a deposição de filmes metálicos e na Seção 5.2, é apresentada a construção do eletroímã. Na Seção 5.3, é feita uma análise do sistema com relação a polarização do sinal, e por fim na Seção 5.4, são mostrados os resultados obtidos experimentalmente.

5.1 PREPARAÇÃO DE TRANSDUTORES COM FILMES METÁLICOS

Os transdutores foram construídos com deposição de um filme metálico na ponta clivada das fibras ópticas, em que antes do corte é feita uma limpeza das fibras com álcool, então as fibras são colocadas no suporte mostrado na Figura 32, tendo esse suporte capacidade para até 48 fibras. Em seguida, o suporte com as fibras ópticas é levado para o processo de metalização das faces utilizando um equipamento de metalização por sputtering, na Figura 32, pode ser visto esse suporte metálico com as fibras inseridas nele.

Figura 32 - Suporte para preparar múltiplas estruturas sensoras



Fonte: O Autor, 2023.

O equipamento utilizado para deposição pertence ao Departamento de Física da UFPE, é o Balzers-Pfeffer modelo PLS 500, conforme mostra a Figura 33. A câmara de vácuo do equipamento possui quatro magnetrons, um bloqueador e um suporte em forma de disco para a amostra. Os alvos são colocados nos eletrodos. Como o dispositivo possui quatro eletrodos, quatro metais diferentes podem ser depositados simultaneamente. A barreira que cobre os eletrodos tem a função de

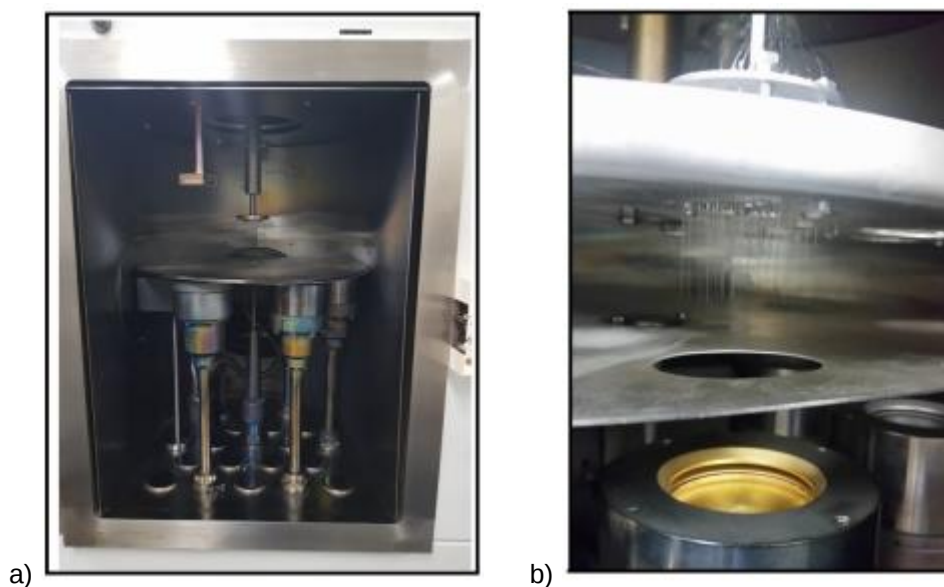
selecionar os eletrodos para deposição de metal, a câmara do sputtering aberta é mostrada na Figura 34a. O suporte com as fibras está localizado acima da abertura do bloqueador dos eletrodos, conforme mostrado na Figura 35b. Como pode ser visto, as fibras são colocadas com as faces voltadas para baixo, posteriormente a câmara é fechada, então é criado o vácuo para a deposição do metal nas fibras.

Figura 33 - Equipamento de sputtering utilizado na deposição (a) com câmara de vácuo fechada (b) com câmara de vácuo aberta



Fonte: Hebio, 2022.

Figura 34 - (a) Câmara do sputtering onde podem ser vistos os eletrodos e a posição das fibras dentro da câmara (b) Posição onde é colocado o suporte com as fibras



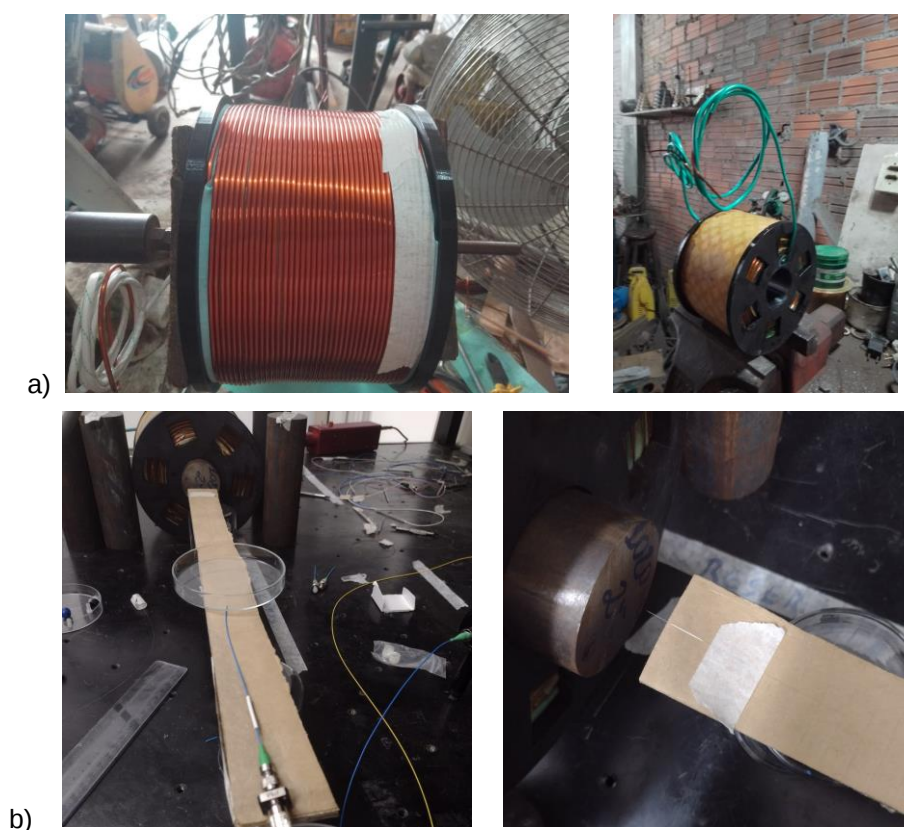
Fonte: Hebio, 2022.

Foram feitas amostras com dois metais diferentes, em um primeiro momento, foi feita uma deposição de camadas de ferro (Fe) na fibras, e em outro momento, foram feitas amostras com permalloy de ferro-níquel (Fe(81)/Ni(19)), sendo a espessura dos metais depositados de 200 nm, essa espessura é bem maior que o comprimento pelicular dos materiais, o que dá uma boa margem para que efeitos de oxidação não afetem a resposta do sinal.

5.2 FABRICAÇÃO DO ELETROÍMÃ

O campo magnético para realização dos experimentos foi gerado através de um eletroímã, esse eletroímã consiste em um núcleo metálico envolto de um solenoide. O molde do solenoide é de plástico, e foi feito em uma impressora 3D. O molde de formato cilíndrico tem um comprimento de 10 cm e seu diâmetro é de 6 cm, nesse molde foram passadas 821 espiras de fio de cobre awg11. A fonte de corrente utilizada para alimentar esse eletroímã é a BOP 20-20D da KEPCO, na Figura 35a são mostradas imagens do solenoide.

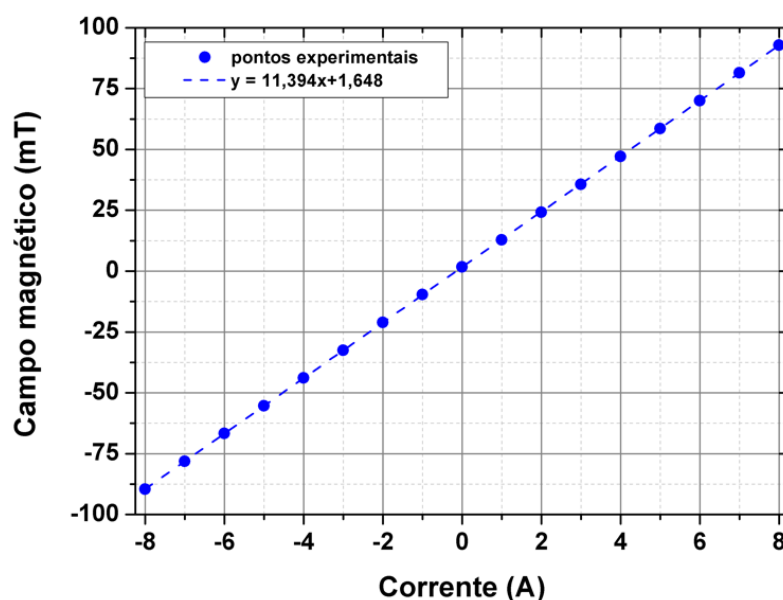
Figura 35 - Imagens a) do solenoide construído e b) do eletroímã posicionado para a realização das medidas



Fonte: O Autor, 2023.

Com o solenoide construído, é colado um núcleo de metal cilíndrico no seu eixo central para formação do eletroímã, como pode ser visto na Figura 35b. Esse eletroímã foi calibrado para saber o campo magnético correspondente à corrente aplicada em seus terminais, e o resultado está na Figura 36, onde é visto os pontos experimentais coletados na calibração, como também o ajuste linear a esses pontos. O resultado mostra a linearidade da resposta do eletroímã.

Figura 36 – Gráfico dos pontos coletados para o campo magnético do eletroímã em função da corrente aplicada em seus terminais, juntamente com o ajuste linear aos pontos

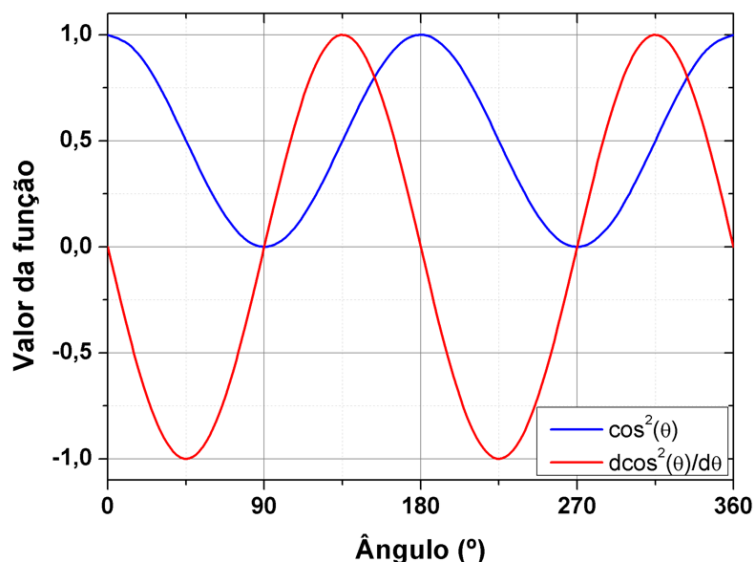


Fonte: O Autor, 2023.

5.3 ANÁLISE DO SISTEMA DE POLARIZAÇÃO

Como mostrado na Seção 3.1, o sistema de polarização é formado pelo circulador óptico, que também é um polarizador em linha, e pelo controlador de polarização. De acordo com a Lei de Malus, a luz ao passar por um polarizador tem sua intensidade modificada por um fator de $\cos^2(\theta)$, em que θ é ângulo entre a polarização da luz e o eixo de transmissão do polarizador. Devido à natureza da forma da função $\cos^2(\theta)$, há uma variação menor do valor da função para variações de θ em torno de 0° e múltiplos de 90° , isso é ilustrado na Figura 37, onde é visto os gráficos da função $\cos^2(\theta)$ e de sua derivada.

Figura 37 – Gráficos da função $\cos^2(\theta)$, curva em azul, e de sua derivada, curva vermelha



Fonte: O Autor, 2023.

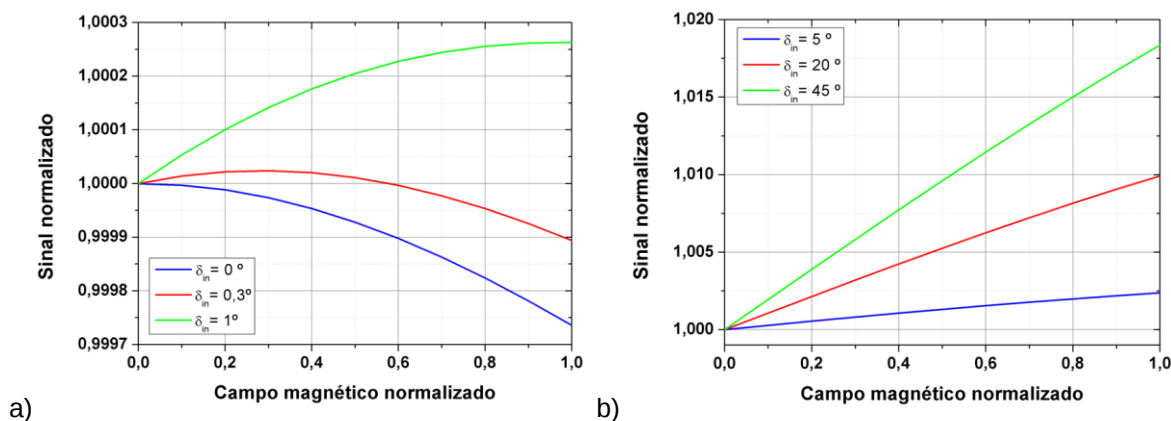
Tendo em vista que para os metais utilizados, a rotação do ângulo de polarização de acordo com o campo magnético é pequena, é importante escolher o ângulo de polarização da onda incidente que maximize a sensibilidade do sensor. Na Figura 38 é mostrado um estudo da reflectância do sinal, na figura são apresentados gráficos do sinal normalizado, que é sinal refletido para um dado campo magnético; dividido pelo sinal refletido quando o campo magnético é nulo ($R(B)/R_0$), em função do campo magnético normalizado pelo valor de saturação do ferro para diferentes ângulos de incidência. A Figura 38a mostra os resultados para os ângulos 0°, 0,3° e 1°, e a Figura 38b para os ângulos 5°, 20° e 45°. Os resultados foram gerados considerando os parâmetros do ferro que estão na Tabela 1.

A partir da Figura 38a, é observado que a modulação do sinal com o campo não tem um comportamento linear para ângulos de incidência com módulos menores que 1°, e se comparado com a Figura 38b, nota-se que ângulos pequenos apresentam uma sensibilidade baixa para o sistema sensor. Já pela Figura 38b, observa-se uma boa linearidade do sinal para ângulos maiores que 5° e que ângulos próximos de 45° são os que apresentam uma melhor sensibilidade.

Através da inclinação das retas, que se ajustam as curvas do sinal normalizado por campo magnético normalizado, é possível observar qual ângulo de polarização da onda incidente vai gerar maior sensibilidade para o sensor. Esse resultado pode ser

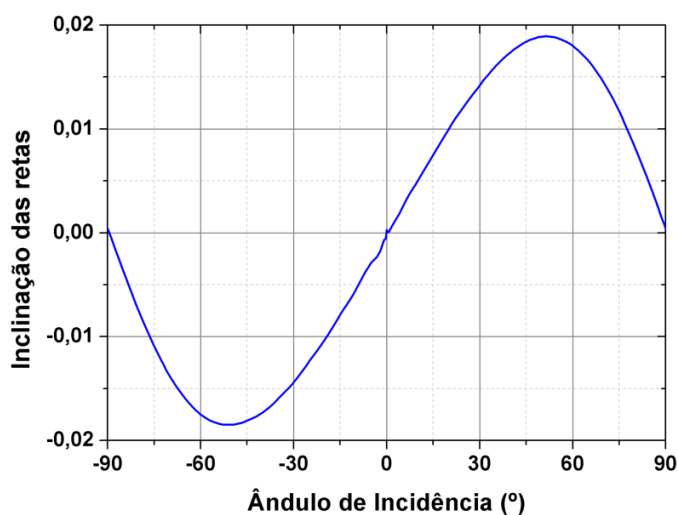
visto na Figura 39, onde é observada uma maior sensibilidade para ângulos de incidência próximos de 50° ou de -50° .

Figura 38 - Curvas de Sinal normalizado para onda S em função do campo magnético normalizado, para ângulos de polarização de incidência de (a) 0° , $0,3^\circ$, 1° , (b) 5° , 20° e 45°



Fonte: O Autor, 2023.

Figura 39 – Gráficos da inclinação das retas, que se ajustam as curvas de sinal normalizado, em função do ângulo de polarização da onda incidente



Fonte: O Autor, 2023.

5.4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Nesta seção, serão abordados os resultados experimentais obtidos utilizando Fe e o Fe(81) / Ni(19), como materiais magnéticos na composição do sensor. O procedimento para juntar o transdutor, que é a fibra com o material magnético depositado, ao resto do sistema, é feito através do processo de fusão de fibras pela

máquina de fusão Fitel s178A, essa máquina não é específica para fusão de fibras mantenedoras de polarização, de modo que, essa fusão gera uma grande fonte de ruído no sistema. Para mitigar o ruído do sistema, foi construído um programa em python, em que para cada valor de campo magnético são feitas 10 medidas, uma por segundo, e o resultado para cada ponto é a média dessas 10 medidas, juntamente com a média, também foi calculado o desvio padrão que serão mostrados nos gráficos deste capítulo. O código escrito em python foi colocado no Apêndice B desta tese.

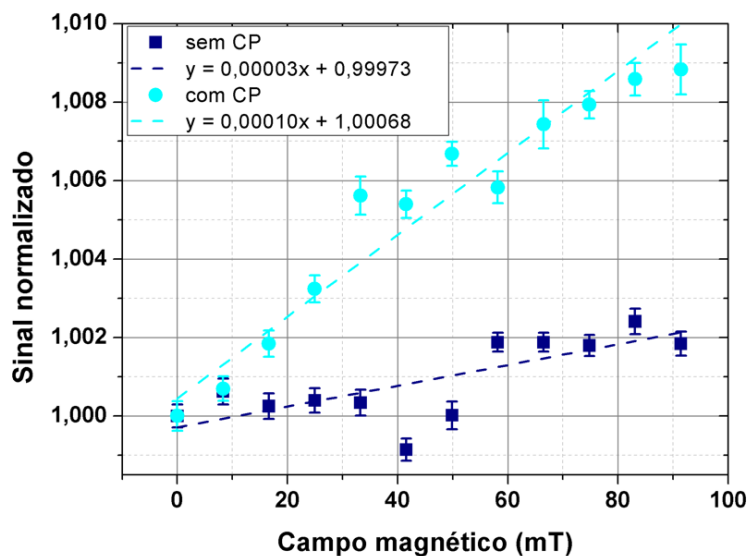
Na Subseção 5.4.1, são abordados os experimentos utilizando o ferro, já na Subseção 5.4.2, estão resultados para o permalloy ferro-níquel.

5.4.1 Experimentos com ferro

Como citado na Seção 5.1, foram depositados 200 nm de ferro na ponta da fibra para realização desses experimentos. Foram levadas 10 fibras para deposição, no entanto apenas 1 manteve a aderência do ferro na ponta da fibra, e essa fibra, após algumas movimentações bruscas, também teve a camada de ferro despregada da face da fibra. O que possibilitou poucas obtenções de resultados com esse material, um desses resultados pode ser visto na Figura 40, onde estão os valores obtidos para o valor do sinal normalizado em função do campo magnético aplicado, além de curvas de ajuste linear para os dois conjuntos de pontos.

O primeiro conjunto de pontos, azul escuro, foi coletado utilizando a configuração experimental sem o controlador de polarização (CP), enquanto o segundo conjunto de pontos, azul claro, foi utilizado o controlador de polarização. Esses ajustes possibilitam, juntamente com o resultado da Figura 39, encontrar o ângulo de polarização da onda incidente no metal, no entanto o eixo horizontal da Figura 39 está normalizado pelo campo de saturação, para fazer uma correspondência entre os resultados é preciso pegar o valor das inclinações da Figura 40 e multiplicar pelo valor do campo de saturação. Pelos resultados obtidos, o campo magnético de saturação para essa amostra de ferro foi de 90 mT, o que multiplicando esse valor pelas inclinações encontradas na figura tem-se o valor de 0,0027 para o experimento sem o CP, e de 0,009, para o experimento com o controlador, o que significa que no experimento sem o CP tem um $\delta_{in} \approx 5^\circ$ enquanto para o experimento utilizando o controlador de polarização foi encontrado $\delta_{in} \approx 20^\circ$.

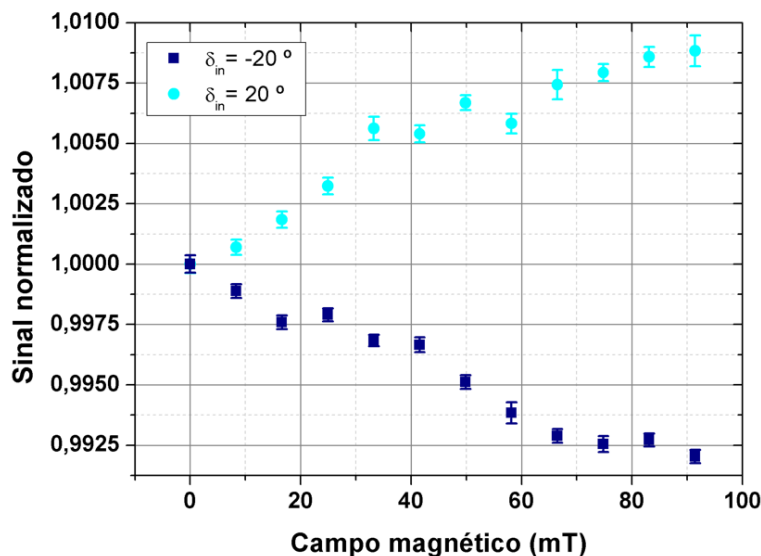
Figura 40 – Gráficos dos pontos experimentais do sinal normalizado em função do campo magnético aplicado, juntamente com as suas retas de ajuste linear



Fonte: O Autor, 2023.

A Figura 41 mostra outro resultado obtido com a amostra de ferro, além do resultado obtido para um $\delta_{in} \approx 20^\circ$ também se encontra o resultado para $\delta_{in} \approx -20^\circ$.

Figura 41 – Gráficos do sinal normalizado em função do campo magnético aplicado, para ângulos de incidência de -20° e 20°



Fonte: O Autor, 2023.

Utilizando os dados da Figura 40, podem ser feitos cálculos para a sensibilidade e a resolução do sensor. Para a situação com $\delta_{in} \approx 20^\circ$, o valor da sensibilidade pode ser dado pela inclinação da curva de ajuste, ou seja $0,1 \text{ T}^{-1}$. Já a resolução do sistema

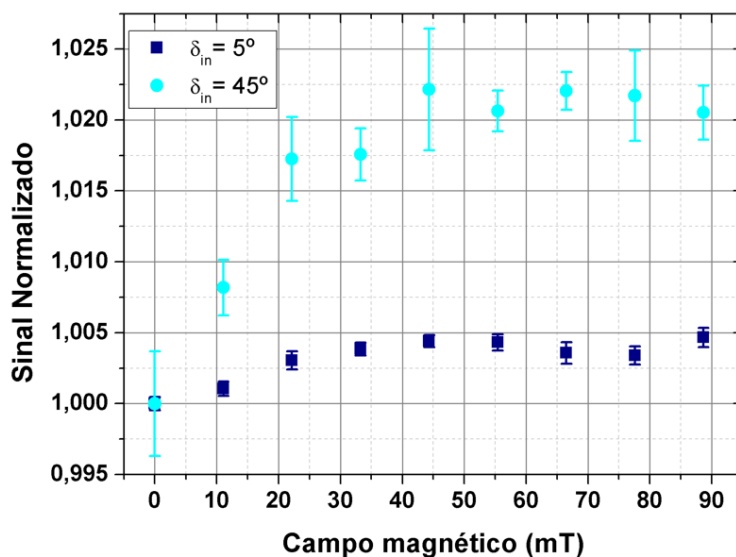
é dada pela razão da menor variação que um sistema consegue detectar pela sensibilidade do sistema. Geralmente, a resolução do equipamento de captação do sinal ou o ruído do sistema é que limita a menor variação que um sistema consegue detectar. Nesse caso, o limitante é o ruído do sistema, aqui podendo ser dimensionado pela média do desvio padrão das medidas, que é de 0,0004, então a resolução é esse valor dividido pela sensibilidade, dessa forma, é obtido o valor de 4 mT.

Esses resultados com o ferro foram obtidos com a amostra desmagnetizada e com a variação do campo sempre na direção crescente, estudos de magnetização remanescente e histerese não foram possíveis pela danificação dessa amostra e por não ter sobrado outras. Na próxima subseção, que mostra os resultados obtidos com permalloy, serão abordados esses pontos.

5.4.2 Experimentos com permalloy ferro(81)/níquel(19)

Diferente do ferro, o permalloy ficou bem fixados nas fibras, o que possibilitou mais oportunidade para investigar diferentes aspectos. Os resultados foram gerados utilizando o controlador de polarização no sistema, para controlar o ângulo de polarização da onda incidente na amostra magnética. Na Figura 42 é mostrado o gráfico do sinal normalizado em função do campo magnético para ângulos de incidência próximos de 5° e 45° .

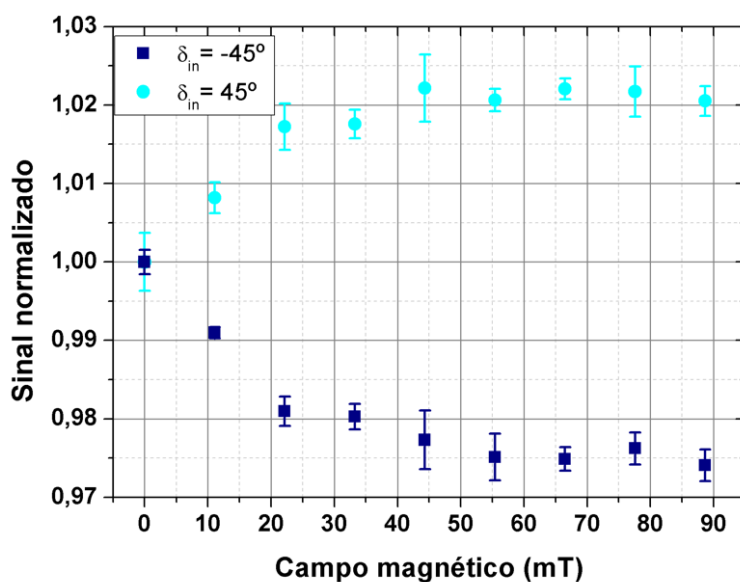
Figura 42 – Gráficos do sinal normalizado da onda S em função do campo magnético aplicado, para ângulos de incidência de 5° e 45°



Fonte: O Autor, 2023.

A partir da Figura 42 é observado, assim como notado nas análises com o ferro, que ângulos próximos de 5° geram uma pequena variação da reflectância do sinal, enquanto ângulos próximos de 45° maximizam essa variação, devido a isso, os resultados apresentados de agora em diante terão todos ângulos de incidência próximos de 45° ou -45° . A Figura 43 mostra o gráfico do sinal normalizado para $\delta_{in} \approx -45^\circ$ juntamente com o resultado de $\delta_{in} \approx 45^\circ$.

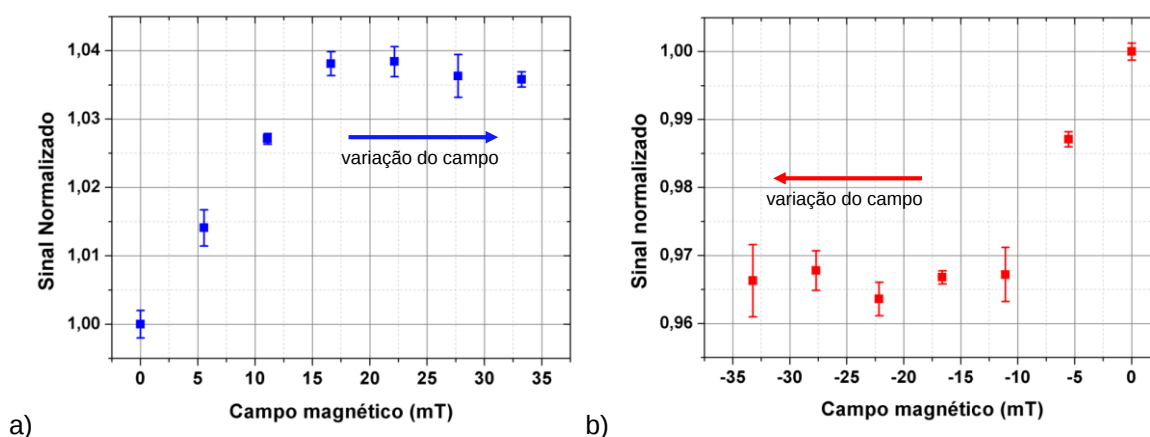
Figura 43 – Gráficos do sinal normalizado em função do campo magnético aplicado, para ângulos de incidência de -45° e 45°



Fonte: O Autor, 2023.

Na Figura 44, é mostrado o resultado do sinal normalizado em função do campo magnético, sendo o resultado da Figura 44a gerado para campos positivos e com variação do campo de forma crescente, enquanto a Figura 44b está o resultado para campos negativos, em que a variação do campo foi feita de forma decrescente, o ângulo de polarização da onda incidente para essas curvas foi de aproximadamente 45° . Até aqui, os resultados mostrados foram obtidos com campos magnéticos positivos e com sua variação de forma crescente, de agora em diante, nesta subseção, os gráficos serão acompanhados com setas para indicar a direção que o campo magnético foi alterado, devido ao permalloy ter mostrado uma magnetização remanescente, essa direção da variação do campo é relevante para os resultados.

Figura 44 - Sinal normalizado em função do campo magnético (a) com valores positivos e variação crescente, e (b) com valores negativos e variação decrescente



Fonte: O Autor, 2023.

Pelos resultados da Figura 44, nota-se a importância da direção do campo no efeito magneto-óptico, em que a orientação do campo magnético altera o sentido do giro de polarização da onda eletromagnética.

Utilizando os dados da Figura 44a, é possível fazer os cálculos para sensibilidade e resolução do sensor. O valor da sensibilidade é a razão do sinal normalizado pela variação do campo magnético, considerando o intervalo até a amostra magnetizar. Considerando que a amostra satura em um campo de 20 mT, é encontrado o valor de $1,918 \text{ T}^{-1}$ para a sensibilidade do sensor. Sendo o desvio padrão médio das medidas igual a 0,00256, a resolução do sistema é de 1,335 mT.

Os resultados obtidos neste trabalho podem ser comparados com os resultados da literatura, por meio do cálculo da resolução dos sensores. Na Tabela 3, mostramos esses valores. Considerando um equipamento capaz de detectar uma variação de 0,1% na intensidade do sinal óptico, e para sensores que dependem da variação do comprimento de onda do sinal, um espectrômetro com resolução de 10 pm, a resolução é calculada dividindo o limiar de detecção dos equipamentos pela sensibilidade do sensor. Da Tabela 3, observa-se que os sensores propostos nesta tese apresentam boas resoluções, se comparado com os sensores de efeito magneto-óptico relatados anteriormente, e em específico o sensor simulado utilizando o material Ce:YIG possui resolução comparáveis aos sensores de melhor resolução encontrados na literatura.

Tabela 3 - Sensibilidades de alguns sensores de campo magnético à base de fibra óptica

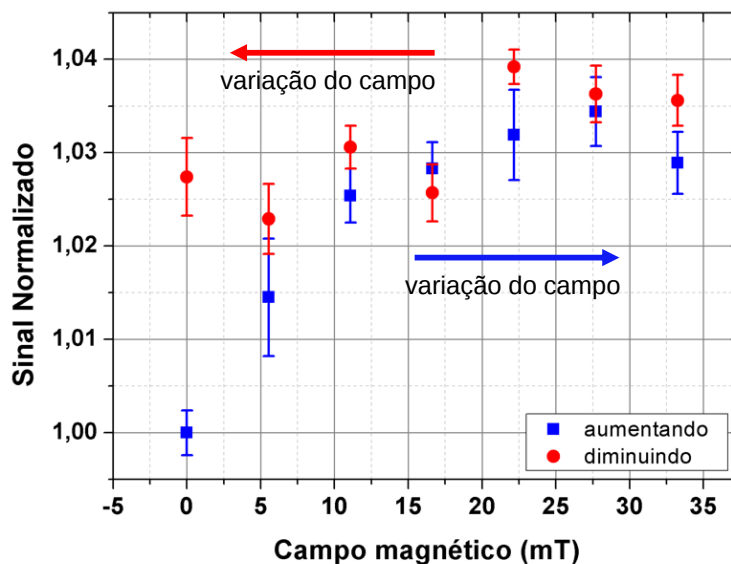
Técnicas ou efeitos usados no sensor	Referência	Sensibilidade	Faixa de operação	Resolução (mT)
Interferometria Modal	(CHEN, Yaofei et al., 2013)	905 pm/mT	4,0-10,0 mT	0,011
	(YIN <i>et al.</i> , 2017)	982 pm/mT	0-14 mT	0,010
	(LI, Y. et al., 2019)	-2370 pm/mT	2-6 mT	0,004
Cavidade de Fabry-Perot	(ZHANG, P. et al., 2015)	8547,3 pm/mT	23,2-30 mT	0,001
	(CHEN, F. et al., 2015)	1510 nm/mT	0,368-3,086 mT	$0,007 \times 10^{-3}$
	(ZHENG, Y. et al., 2017)	4187 pm/mT	0-1 mT	0,002
Grade de Bragg	(LIU, H.; OR; TAM, 2012)	3,72 pm/mT	0-183,08 mT	2,67
	(CHEN, Yaofei et al., 2013)	1,08 pm/mT	0-50 mT	9,259
	(BAO et al., 2018)	24,2 pm/mT	0-12 mT	0,413
Efeito magneto-optico de Faraday	(SUN; JIANG, S.; MARCIANTE, 2010)	0,49 rad/T	0,02-3,2 T	4,510
	(PANG et al., 2019)	0,033 T ⁻¹	0-0,406 T	30,303
Transdutor Ce:YIG(saturaçã	proposto	(Tabela 3)	0-200 mT	0,224
Transdutor Ce:YIG (20% of saturation)	proposto	(Tabela 3)	0-40 mT	0,051
Transdutor Fe	proposto	0,1 T ⁻¹	0-90 mT	4
Transdutor Fe(81)/Ni(19)	proposto	1,918 T ⁻¹	0-20 mT	1,335

Fonte: O Autor, 2023.

Um ponto importante de se observar é a magnetização residual. O gráfico da Figura 45 mostra a resposta quando o material está desmagnetizado, e vai sendo aplicado um campo externo até o material ficar total magnetizado, pontos azuis. Em seguida, o campo externo vai sendo diminuído até chegar a um valor nulo, pontos

vermelhos. O resultado mostra que ao ser retirado o campo o material permanece magnetizado.

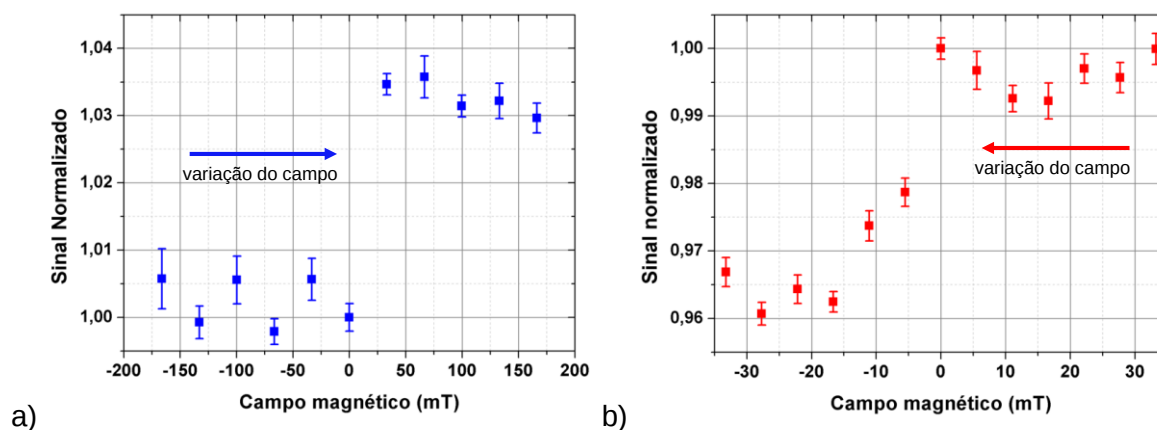
Figura 45 - Gráficos do sinal normalizado com o aumento do campo, pontos azuis, e diminuindo o campo estando o material magnetizado, pontos vermelhos



Fonte: O Autor, 2023.

Ainda para analisar o comportamento da magnetização da amostra, o campo magnético necessário para alcançar a saturação e a influência do sentido de aplicação do campo magnético, são apresentados os gráficos da Figura 46.

Figura 46 - Sinal normalizado em função do campo magnético (a) para uma variação de campo de -166 a 166 mT, e (b) para uma variação de 33 a -33 mT



Fonte: O Autor, 2023.

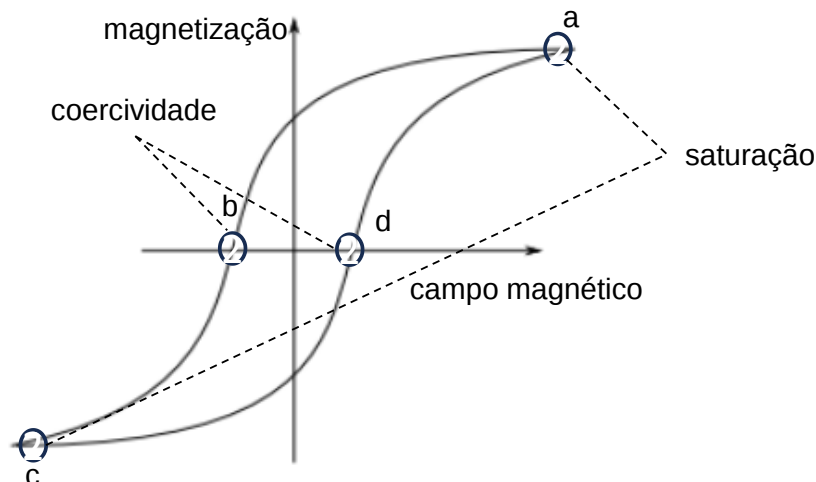
Na Figura 46a, é mostrado o gráfico do sinal normalizado, em que as medições foram iniciadas com a amostra saturada, sob ação de um campo de -166 mT, em

seguida o campo foi sendo variado até um valor de 166 mT. Como é possível observar no gráfico, uma vez magnetizada, a amostra tende a permanecer saturada até quando o campo é retirado, quando o campo passa a ser positivo há uma mudança na magnetização e devido ao passo adotado na obtenção desse resultado, como pode ser visto pelos outros pontos que permanecem com aproximadamente o mesmo nível de reflectância, a amostra já está saturada, o que já era esperado pois observando os outros resultados, nota-se que esse material satura com um campo de aproximadamente 20 mT. A Figura 46b mostra o caminho contrário, onde o campo foi variado de 166 mT até -166 mT. Tendo em vista o valor do campo magnético de saturação da amostra, na Figura 46b o resultado foi gerado varrendo o campo de 33 mT até o valor de -33 mT, dessa forma é possível observar melhor a transição da magnetização do material.

Utilizando a instrumentação proposta nesse trabalho é possível gerar gráficos similares a uma curva de histerese. Na figura 47, está uma curva de histerese padrão, em que é mostrado a magnetização de uma amostra em função do seu campo magnético. Alguns pontos importantes estão em destaque na imagem, o ponto *a* está na região do gráfico que identifica a saturação do material, ou seja, quando o material atinge sua magnetização máxima e um acréscimo de campo não altera mais a magnetização do material, o ponto *c* também está na saturação porém com magnetização do material no sentido contrário. Já o ponto *b* e *c* mostram os valores negativo e positivo do campo necessários para anular a magnetização de um material, que anteriormente foi levado até o regime de saturação, esse campo é chamado de campo coercivo. Essa coercividade depende do tipo do material, em geral materiais ferromagnéticos tem alta coercividade, e também do eixo da amostra em que o campo está sendo aplicado.

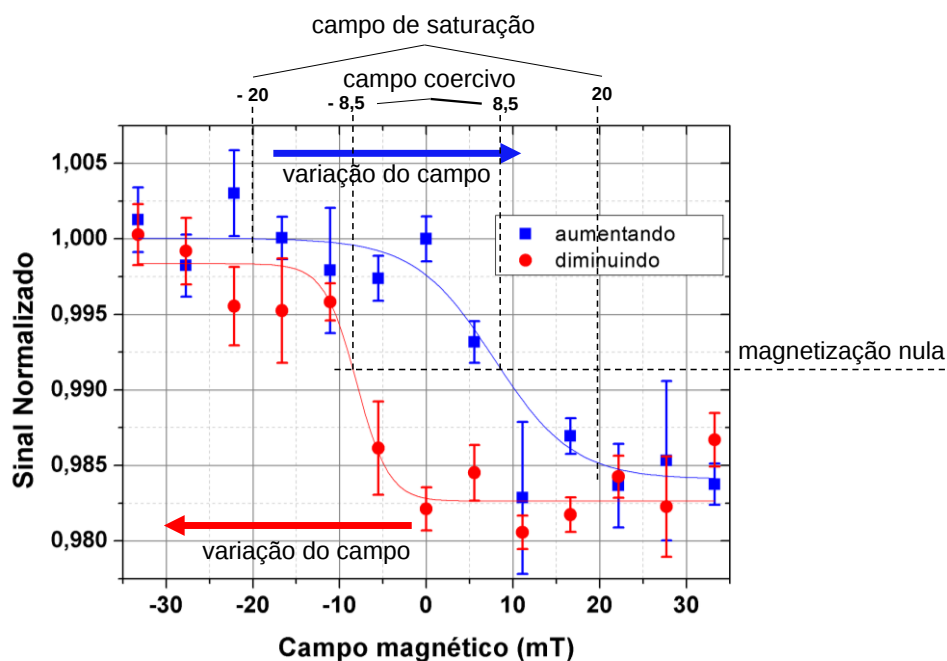
Então, utilizando o permalloy, foi gerado o gráfico da Figura 48, que é similar a uma curva de histerese, sendo que em vez da magnetização no eixo vertical, temos o sinal normalizado. As curvas de ajuste que podem ser vistas no gráfico, são funções sigmóides de Boltzmann. A partir do gráfico são identificados o campo magnético de saturação, 20 mT, e o campo coercivo, 8,5 mT, para a amostra de permalloy utilizada.

Figura 47 – Exemplo de uma curva de histerese



Fonte: O Autor, 2023.

Figura 48 - Gráficos do sinal normalizado, simular a uma curva de histerese



Fonte: O Autor, 2023.

De acordo com esses resultados e os outros que analisam a magnetização remanescente do material, conclui-se que para sua utilização na composição do sensor, tendo em mente uma operação contínua, são necessários mais estudos sobre sua desmagnetização espontânea no tempo. No entanto através dos resultados gerados observasse que o sistema pode ser usado com intuito de caracterizar materiais magnéticos.

5.4.3 Método para obtenção da rotação kerr e constante magneto-óptica

A caracterização de materiais magnéticos é uma área importante da física da matéria condensada, pois permite estudar as propriedades e funcionalidades dos materiais que dependem de suas estruturas magnéticas. Uma das técnicas mais usadas para a caracterização de materiais magnéticos é o magnetômetro de Kerr (MOKE), que consiste em medir a rotação da polarização da luz refletida por uma amostra magnetizada. O MOKE é uma técnica simples, rápida e sensível, mas também apresenta algumas limitações, como interferências externas e dificuldade de alinhamento dos componentes ópticos, uma vez que essa técnica é feita no espaço livre.

A estrutura do sistema apresentada nessa tese pode ser usada como um magnetômetro de Kerr em fibra óptica. Utilizando a Lei de Malus para polarizadores, na situação em que a amostra está desmagnetizada, a intensidade do sinal refletido que passa pelo polarizador e chega ao detector é

$$I = I_0 \cos^2(\delta_{in}). \quad (33)$$

Após um campo magnético ser aplicado para magnetizar a amostra a intensidade do campo se torna

$$I = I_0 \cos^2(\delta_{in} + \delta_{Kerr}) \quad (34)$$

sendo δ_{Kerr} o ângulo de rotação Kerr. Dividindo a equação (33) pela (34) e fazendo as devidas operações, obtém-se que o ângulo de rotação Kerr é dado por

$$\delta_{Kerr} = \arccos\left(\frac{\cos(\delta_{in})}{\sqrt{SN}}\right) - \delta_{in} \quad (35)$$

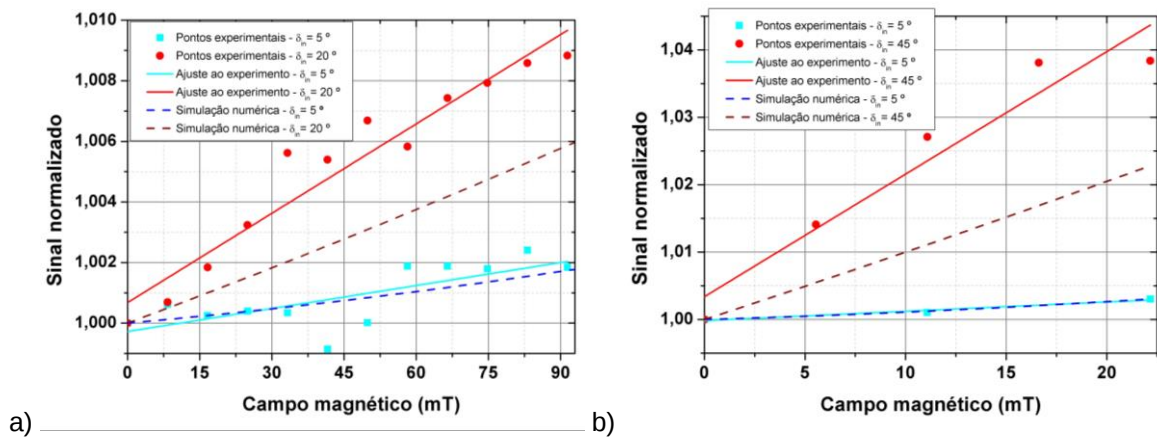
em que SN é o sinal normalizado. Utilizando o sinal normalizado encontrado na Figura 41 e na Figura 44a encontramos o ângulo de rotação Kerr máximo das amostras de ferro e permalloy, que é quando a magnetização está saturada, e o valor encontrado é de 0,654 ° para o ferro, e de 1,075 ° para o permalloy Fe(81)/Ni(19).

Utilizando o comprimento de penetração pelicular, considerando que o é a distância que a luz percorre no material, juntamente com os valores encontrados para δ_{Kerr} , e os valores dos índices de refração do ferro e do permalloy que estão na Tabela 1, podemos utilizar a equação 10 para calcular a constante magneto-óptica do material. Pode-se calcular o comprimento pelicular dos materiais pela seguinte equação :

$$\sigma_p = \frac{\lambda_0}{4\pi\kappa}, \quad (36)$$

sendo λ_0 o comprimento de onda da luz, e κ a parte imaginária do índice de refração. Assim encontramos os valores para o comprimento pelicular de 22,184 nm e de 17,761 nm para o ferro e o permalloy, respectivamente. Desta forma, é estimado um valor para constante magneto-óptica de 0,021 - j0,032 para o ferro, e de 0,034 - j0,053 para o permalloy. Com esses valores para constante magneto-óptica dos materiais, foram gerados novos resultados através de simulação numérica, utilizando o COMSOL. Esses resultados podem ser vistos na Figura 49, juntamente com as curvas de ajustes para os pontos coletados experimentalmente. As curvas para o ferro estão na Figura 49a, para ângulos de incidência de 5 ° e 20 °, e na Figura 49b estão as curvas para o permalloy, para os ângulos de incidência de 5 ° e 45 °.

Figura 49 – ajustes aos pontos experimentais e resultado da simulação numérica, usando as contantes magneto-ópticas obtidas, para a) o ferro e b) o permalloy



Fonte: O Autor, 2023.

6 CONTROLADOR DE POLARIZAÇÃO BASEADO NO EFEITO FARADAY INTEGRADO COM FIBRA ÓPTICA DE PERFIL D METALIZADA

Efeitos da polarização da luz vem sendo cada vez mais utilizados em dispositivos e sistemas ópticos, devido às informações que esse estado da luz pode armazenar e transmitir. Uma das formas de transportar essa informação é através de fibras ópticas, que podem ter menos interferência e mais praticidade para o sistema. Tendo em vista a importância desse tipo de sistema, este capítulo aborda a modelagem de um controlador de polarização inovador, baseado no Efeito Faraday magneto-óptico e na absorção da luz em uma fibra perfil D metalizada. O dispositivo pode ser controlado eletronicamente por solenoides, o que possibilita um melhor desempenho, quando comparado com controladores mecânicos.

Este capítulo está estruturado da seguinte forma: Na Seção 6.1, é apresentada outra alternativa para a modelagem analítica do efeito magneto-óptico Faraday, utilizando o Formalismo matricial de Jones; Na Seção 6.2, é apresentada a modelagem computacional, usando o método de elementos finitos, por meio do COMSOL; e na Seção 6.3, são destacados os resultados e discussões obtidos analiticamente e numericamente para o controlador de polarização.

6.1 MATRIZES DE JONES E EFEITO MAGNETO-ÓPTICO

Uma alternativa simplificada dos cálculos, quando se está interessado na transmissão de uma onda através de vários meios, é utilizar o formalismo das matrizes de Jones. As ondas incidente e transmitida são representadas pelos vetores de Jones. Esses vetores são matrizes coluna 2x1, e cada componente da estrutura é representado por uma matriz 2x2, de forma que (ZÍLIO, S., 2009)

$$\mathbf{E}_t = \mathbf{A}\mathbf{E}_i \quad (37)$$

em que $\mathbf{E}_i$ e $\mathbf{E}_t$ são os campos incidentes e transmitidos e $\mathbf{A}$ é a matriz do componente óptico, onde a luz é propagada.

De maneira geral, o efeito magneto-óptico descreve a interação da luz com a matéria magnetizada (ZAK et al., 1990). Como visto na Seção 3.2, A resposta magneto-óptica do material é descrita pelo tensor permissividade elétrica relativa do material magnético, se é magnetizado apenas uma direção, pode ser escrito como

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \varepsilon \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & jm_x Q_0 \\ 0 & -jm_x Q_0 & 1 \end{pmatrix} \quad (38)$$

em que ε é a permissividade relativa do material magnético, não-magnetizado, Q_0 é a constante magneto-óptica e m_x é a magnetização normalizada do material na direção x . Considerando o regime de frequências ópticas, a permeabilidade magnética relativa é aproximadamente 1 (MANSURIPUR, 1999).

Utilizando (38) nas equações de Maxwell, e considerando que o material é magnetizado apenas na direção de propagação da onda eletromagnética (configuração polar), e essa direção é x , os modos normais de propagação no material magnetizado são gerados, onde as polarizações circulares apresentam os seguintes índices de refração (ZAK et al., 1990):

$$N_{\pm} = N \left(1 \pm \frac{1}{2} Q_0 m_x \right) \quad (39)$$

em que o índice (+) refere-se à polarização circular à direita e o (-) à esquerda, e N é o índice de refração do material não-magnetizado (ZAK et al., 1990).

Em particular, o efeito Faraday explica a rotação do plano de polarização de uma onda eletromagnética, com polarização linear, que se propaga em um material magnetizado (MANSURIPUR, 1999). Sabendo que uma onda linearmente polarizada pode ser escrita como a junção de duas ondas circularmente polarizadas, uma à direita e outra à esquerda, utilizando o formalismo de Jones, têm-se para o campo incidente (ZÍLIO, S., 2009)

$$\mathbf{E}_i = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 \\ -j \end{pmatrix} + \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 \\ j \end{pmatrix} \quad (40)$$

Ao percorrer um comprimento d do material, uma birrefringência circular é gerada no material quando magnetizado, e as polarizações circulares adquirem fases diferentes. Assim, a onda eletromagnética transmitida no material se torna

$$\mathbf{E}_t = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 \\ -j \end{pmatrix} e^{-jk_+ d} + \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 \\ j \end{pmatrix} e^{-jk_- d} = e^{-j\psi} \left(\frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 \\ -j \end{pmatrix} e^{j\phi} + \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 \\ -j \end{pmatrix} e^{-j\phi} \right) \quad (41)$$

em que $\psi = (k_+ + k_-)d/2$ e $\phi = (k_- - k_+)d/2$, sendo $k_{\pm} = 2\pi N_{\pm}/\lambda$, e λ é o comprimento de onda da luz no vácuo. Fazendo a soma das matrizes em (41), é obtido

$$E_t = e^{-j\psi} \begin{pmatrix} e^{j\phi} + e^{-j\phi}/2 \\ e^{j\phi} - e^{-j\phi}/2j \end{pmatrix} = e^{-j\psi} \begin{pmatrix} \cos\phi \\ \sin\phi \end{pmatrix} \quad (42)$$

que é uma onda com uma rotação no seu plano de polarização, em relação ao ângulo inicial. Em que ϕ pode ser escrito como

$$\phi = \frac{\pi}{\lambda} (N_+ - N_-)d \quad (43)$$

Por fim, utilizando (39) em (43), tem-se o ângulo de rotação Faraday do material reescrito, pela parte real de

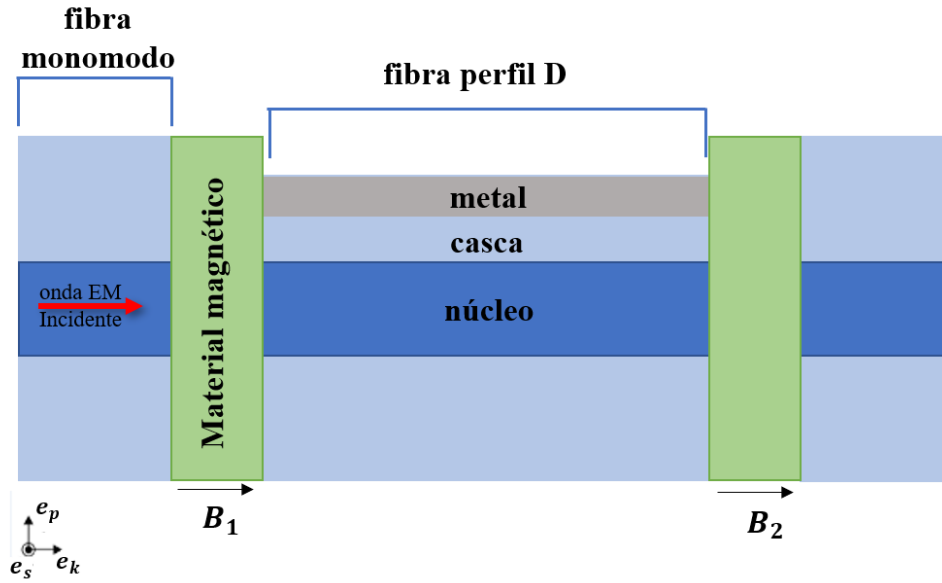
$$\phi = \frac{\pi d N Q_0 m_x}{\lambda} \quad (44)$$

6.2 MODELAGEM COMPUTACIONAL DO CONTROLADOR DE POLARIZAÇÃO

A Figura 50 mostra o modelo físico em 2D do controlador de polarização proposto. Nesse modelo, a onda eletromagnética é propagada numa fibra monomodo, que passa por um material magnético, que serve para ajustar a polarização da luz guiada ao máximo possível na configuração S, aplicando-se um campo magnético B_1 no sentido da propagação da onda (configuração polar). Com isso, diminui-se as perdas na fibra perfil D metalizada, que funciona como polarizador de luz. Ao passar pelo perfil D, a luz, que inicialmente estava polarizada ou não, possui apenas componente S, pois o metal no perfil D absorve toda componente P do sinal propagante na fibra óptica. Em seguida, após a passagem pelo o perfil D, a segunda camada de material magnético gira a polarização da luz guiada de acordo com o ângulo desejado, apenas pelo ajuste da intensidade do campo magnético B_2 no sentido da propagação da onda (configuração polar). Por fim, a luz polarizada é acoplada novamente na fibra monomodo mantenedora de polarização. Nessa configuração de magnetização polar, a aplicação dos campos magnéticos externos nas camadas de material magnético pode ser feita por dois solenoides.

A modelagem computacional da estrutura da Figura 50 foi construída de forma numérica, com auxílio do modelo analítico. Uma vez que a modelagem numérica necessita de muito recurso computacional, a espessura necessária para as camadas de material magnético para realizar a rotação máxima desejada foi selecionada através de (44). E então, a estrutura foi implementada no software COMSOL *Multiphysics*.

Figura 50 - Arquitetura do controlador de polarização à fibra óptica



Fonte: O Autor, 2023.

É importante destacar que, na modelagem computacional, o efeito magneto-óptico é introduzido apenas usando o tensor permissividade elétrica relativa, expresso em (38). Além disso, a excitação da onda eletromagnética na estrutura é feita na forma de um feixe gaussiano, que é uma boa aproximação para o modo fundamental que se propaga numa fibra monomodo (MARCUSE, 1978). Por fim, as transmitâncias, para as ondas S e P, são definidas em termos do campo elétrico, de acordo com as seguintes expressões:

$$T_s = \frac{\int \|E_s^t\|^2 dz}{\int \|E^i\|^2 dz}; T_p = \frac{\int \|E_p^t\|^2 dz}{\int \|E^i\|^2 dz}, \quad (45)$$

em que E_s^t e E_p^t são as componentes do campo elétrico transmitidos, e E^i é o campo total antes de passar pelo controlador de polarização.

Como material magnético, foi escolhido o Ce:YIG, devido sua transparência, e boa resposta magneto-óptica no comprimento de onda de 1550 nm, e para o metal do perfil D, a escolha foi o alumínio. As simulações foram realizadas, considerando uma magnetização normalizada máxima de 0,1, o que equivale a um campo aplicado de 20 mT no Ce:YIG. Outros valores dos parâmetros usados na modelagem estão na Tabela 4.

Tabela 4 - Parâmetros usados na simulação numérica

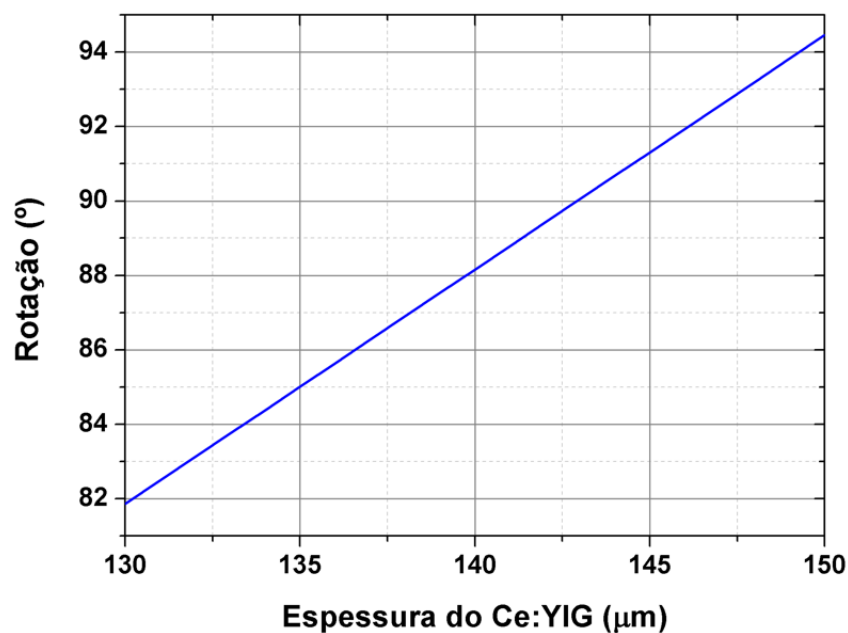
Descrição	Valor
Comprimento de onda	1550 nm
Índice de refração do núcleo da fibra óptica em 1550 nm (MÉNDEZ; MORSE, 2007)	1,444
Índice de refração da casca da fibra óptica em 1550 nm (MÉNDEZ; MORSE, 2007)	1,4378
Índice de refração do Ce:YIG em 1550 nm (GOTO; ONBAŞLÒ; ROSS, 2012)	$2,25+j8,3\times10^{-5}$
Índice de refração do Al em 1550 nm (RAKIĆ et al., 1998)	$1,5137+j15,234$
Constante magneto-óptica do Ce:YIG	$-2,41\times10^{-2}+j8,9\times10^{-7}$
Comprimento da fibra perfil D	3 mm
Casca residual no perfil D	2 μm
Espessura da camada de Al	1 μm
Diâmetro do núcleo das fibras ópticas	8 μm

Fonte: O Autor, 2023.

6.3 RESULTADOS DA MODELAGEM DO CONTROLADOR DE POLARIZAÇÃO

Como a polarização na estrutura é controlada pelo efeito Faraday, um dos pontos fundamentais é a escolha da espessura do material magnético, de forma que possa ser possível obter a rotação desejada com a variação do campo magnético (-20 à 20 mT). Essa caracterização é feita utilizando (44). Esse resultado é destacado na Figura 51. Sendo assim, é selecionada uma espessura de 143 μm para o Ce:YIG. Além disso, é importante destacar que, se o campo magnético externo for no sentido contrário, a rotação da polarização da luz também inverte seu sentido, já que o efeito Faraday depende da direção do campo magnético aplicado, o que para uma range de -20 à 20 mT possibilita uma rotação de 180° no plano de polarização da onda.

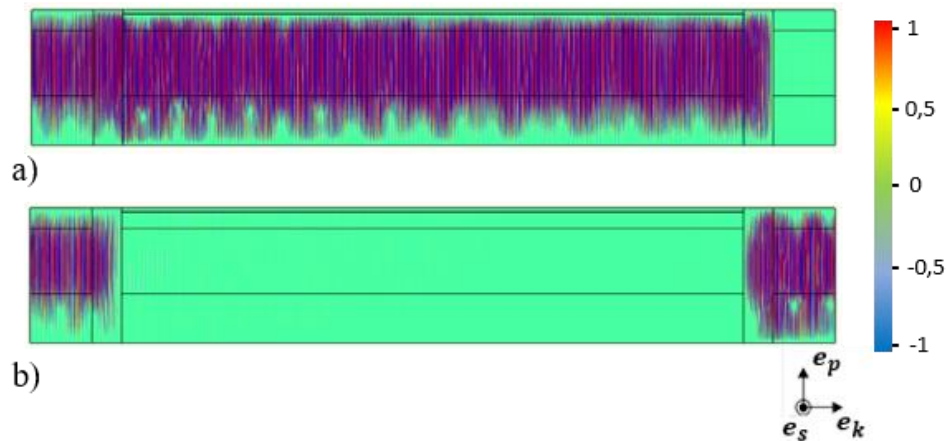
Figura 51 - Rotação do ângulo de polarização em função da espessura do filme de Ce:YIG, para um campo de 20 mT



Fonte: O Autor, 2023.

Com a espessura do Ce:YIG selecionada e os parâmetros da Tabela 4, foi gerada a simulação numérica da estrutura. A distribuição do campo elétrico na estrutura, para valores de campo magnético $B_1 = 0$ e $B_2 = 20$ mT, na primeira e segunda camada de Ce:YIG respectivamente, é observada na Figura 52, onde, na Figura 52a, é verificado o *plot* do campo elétrico para polarização S, enquanto que na Figura 52b, para polarização P. O efeito da rotação pode ser visto comparando as duas figuras, em que inicialmente a onda com uma polarização qualquer, tem sua polarização transformado apenas em S pela fibra perfil D metalizada. Na segunda camada de filme magnético, a polarização é rotacionada em 90° , sendo agora a polarização transformada totalmente em P. A Figura 52 não está apresentada em escala para poder mostrar todas as regiões do dispositivo.

Figura 52 - Distribuição do campo elétrico na estrutura para um campo magnético de 20 mT na segunda camada de material magnético para as componentes a) S e b) P

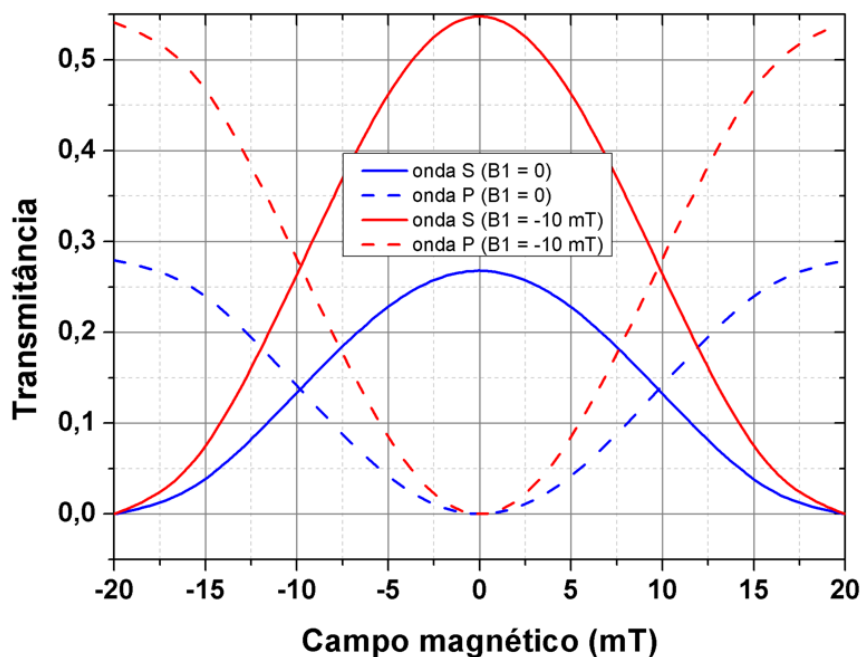


Fonte: O Autor, 2023.

As curvas da Figura 53 mostram a modulação da transmitância das ondas S e P em função do campo magnético na segunda camada de material magnético (B_2), para valores de B_1 igual a zero e a -10 mT, considerando que na entrada do dispositivo a luz está com um ângulo de polarização de 45° , o que significa que metade da intensidade está na polarização S e a outra metade na polarização P. A partir dos resultados amostrados na Figura 53 é observada a funcionalidade da primeira camada de material magnético, onde, com aplicação de um campo magnético nessa região (B_1), pode-se ajustar (girar) a polarização para se ter uma menor perda na fibra perfil D metalizada. No caso em que não há o ajuste da onda na primeira camada de material magnético a perda de sinal em toda estrutura é de 5,72 dB (Onda S, $B_1 = 0$, $B_2 = 0$), enquanto que com o ajuste é de 2,61 dB (Onda S, $B_1 = -10$ mT, $B_2 = 0$).

A Figura 53 mostra também a funcionalidade da segunda camada de material magnético, onde, com aplicação de um campo magnético nessa região (B_2), pode-se ajustar (girar) a polarização para se ter a polarização final da onda na saída do dispositivo. Ou seja, no caso da Figura 53, com $B_2 = 0$ e $B_1 = -10$ mT a polarização da luz na saída do dispositivo é S, com a menor perda de inserção possível (2,61 dB). Já com $B_2 = -20$ mT ou 20 mT e $B_1 = -10$ mT a polarização da luz na saída do dispositivo é P, também com a menor perda possível (2,61 dB).

Figura 53 - Curvas de Transmitância em função do campo aplicado na segunda camada de material magnético para as ondas S e P. As curvas em azul são para o caso de campo magnético nulo aplicado na primeira camada de material magnético e as em vermelho para um campo aplicado de -10 mT



Fonte: O Autor, 2023.

O resultado da Figura 53 foi obtido utilizando uma onda incidente com um ângulo de polarização de 45° , o que significa que metade da intensidade está na onda S e metade na onda P. No caso de uma onda não polarizada incidindo no controlador de polarização a perda seria de 5,71 dB, a mesma encontrada no caso da Figura 53 sem o ajuste do campo B_1 , e a polarização da luz na saída do dispositivo seria S para $B_2 = 0$, ou P para $B_2 = -20$ mT ou 20 mT.

No caso da onda incidente ser polarizada tipo S, temos a saída S se $B_1 = 0$ e $B_2 = 0$, ou temos a saída P se $B_1 = 0$ e $B_2 = -20$ mT ou 20 mT, ambas com a perda de inserção mínima de 2,61 dB. Já no caso da onda incidente ser polarizada tipo P, temos a saída S se $B_1 = -20$ mT ou 20 mT e $B_2 = 0$, ou temos a saída P se $B_1 = -20$ mT ou 20 mT e $B_2 = -20$ mT ou 20 mT, ambas com a perda de inserção mínima de 2,61 dB. Esses casos não são mostrados na Figura 53.

7 CONCLUSÃO E PERSPECTIVAS FUTURAS

Nesta tese, propomos a modelagem computacional para sensores de campo magnético baseados em fibra óptica, com o intuito de construir sensores com sua resposta já otimizada. A modelagem computacional realizada no COMSOL Multiphysics apresentou consistência com o modelo analítico, as pequenas discrepâncias observadas são explicadas pela diferença entre a estrutura da fibra óptica do modelo numérico e o sistema multicamadas do modelo analítico. A influência do ângulo de polarização do sinal óptico e da espessura do material magnético na resposta do sensor, apresentada por meio da análise de um gráfico de superfície, representa um método eficiente para decidir a configuração do sistema sensor, ou seja, na otimização do ângulo de polarização da luz incidente e da espessura do material magnético, dependendo das aplicações (faixa operacional e resolução desejadas).

Os perfis de sensores propostos têm suas particularidades devido às propriedades ópticas e magnéticas dos elementos transdutores utilizados em cada configuração. O transdutor constituído com Ce:YIG como material magnético, que foi apenas simulado, possui maior sensibilidade, em comparação com os que usam material metálico, uma vez que se utilizam do efeito Faraday, também possui uma faixa de operação dinâmica dependendo de sua construção, sendo a faixa de detecção máxima até 0,2 T. Vale destacar que uma das estruturas simuladas alcançou uma resolução de 0,051 mT, para uma faixa de 0 - 40 mT, o que mostra um bom resultado, comparando com sensores encontrados na literatura.

Também foram analisados os efeitos que a temperatura pode causar no sensor composto por Ce:YIG. Observa-se que os efeitos de temperatura são consideráveis, além do sinal ter uma sensibilidade a temperatura que pode chegar a $0,01\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$, a temperatura afeta negativamente a sensibilidade ao campo magnético do sensor. A modelagem, realizada pelo Método dos Elementos Finitos, considera o efeito da temperatura na variação do índice de refração dos materiais e na constante magneto-óptica do material magnético. Os experimentos de simulação foram realizados para a faixa de operação de campos entre 0 e 200 mT e uma faixa de temperatura de 25 a 75 $^{\circ}\text{C}$. Os resultados mostram que a dependência da constante magneto-óptica com a temperatura tem forte influência na resposta do sensor, e que esta influência pode

ser reduzida ajustando o efeito de interferência causado pelo etalon formado pela estrutura do sensor.

Vale ressaltar que se o objetivo é construir um sensor mais independente das variações de temperatura, o ferro pode ser utilizado como material magnético ao invés do Ce:YIG. No entanto, isso acarreta o custo de uma menor sensibilidade ao campo magnético. Apesar da influência da temperatura, os resultados mostram que é possível projetar o sensor com Ce:YIG de forma a ter boa sensibilidade para uma faixa de temperatura pré-determinada, como mostrado para a faixa de 55 a 75 °C. Para aplicações práticas, um sensor de temperatura independente do campo magnético, como um sensor de rede de Bragg de fibra, deve ser usado para obter a temperatura para a medição precisa do campo magnético com o sensor proposto. Por fim, outra possível aplicação para este sensor é utilizá-lo para monitorar temperatura, otimizando sua estrutura para esse fim. Assim, poderia utilizar duas cabeças sensores, uma otimizada para medir o campo magnético e outra para medir a temperatura, para obter ambos os parâmetros simultaneamente.

Foram fabricados transdutores com material metálicos, ferro e permalloy de ferro(81)/níquel(19), que têm menor sensibilidade, pois é baseado apenas no efeito Kerr, no entanto sua resposta magnética tem menos interferência a temperatura, e são simples de serem fabricados. Assim, a escolha de um desses tipos de transdutores dependerá, entre outros fatores, da intensidade dos campos magnéticos a serem monitorados e de seu local de aplicação.

As resoluções dos sensores com as configurações testadas nesse trabalho foram de 4 mT com uma faixa de operação 0 a 90 mT, para o ferro, e de 1,335 mT em uma faixa de operação de 0 a 20 mT, para o permalloy. É importante destacar que a resistência do permalloy a mudar sua magnetização, na configuração testada nesse trabalho, é um contraponto na sua utilização para o sensoramento de campo, é preciso fazer estudos com o ferro para observar se nesse ponto ele apresenta uma melhor resposta, já que não foi possível nesse trabalho. Experimentos com outras espessuras de metal podem ser interessantes, pois as propriedades magnéticas de filmes fino mudam com sua espessura.

O sistema sensor proposto neste trabalho também pode ser utilizado como técnica de caracterização de materiais com propriedades magneto-ópticas, ou seja, para a determinação da constante magneto-óptica desses materiais, semelhante ao magnetômetro de Kerr (MOKE), porém integrado em fibra óptica, sem partes móveis

ou componentes ópticos de espaço livre. Assim, o sistema proposto também pode ter aplicação na caracterização de novos materiais magneto-ópticos. No caso desta tese, foram obtidos os ângulos de rotação Kerr para amostradas saturadas de ferro e permalloy de fe(81)/ni(19), em que os valores encontrados foram de 0,654 ° e 1,075 °, respectivamente.

Além dos sensores propostos, neste trabalho, foi apresentada a concepção e modelagem computacional de um controlador de polarização baseado no Efeito Faraday magneto-óptico e na absorção da luz em uma fibra perfil D metalizada, capaz de entregar uma onda polarizada com qualquer ângulo do plano de polarização desejado, independente da polarização da onda incidente.

Vale destacar que o controlador de polarização apresentado pode ser controlado eletronicamente, uma vez que os campos magnéticos de controle podem ser gerados por solenoides, sendo, portanto, possível se ter um maior controle e automação do sistema, e maior durabilidade pois ele não envolve partes móveis ou de acionamento mecânico (giro ou torção de fibra). O controlador de polarização apresentado também serve como um polarizador, onde, no caso de uma onda não polarizada a perda de inserção no sistema é de 5,71 dB e para uma onda incidente já polarizada a perda no sistema é de 2,61 dB.

Esse trabalho já trouxe algumas contribuições para a literatura através dos trabalhos publicados na revista *IEEE transaction on magnetics*; intitulado de **Computational Modeling of Optical Fiber based Magnetic Field Sensors using Faraday and Kerr Magneto-Optic Effects** (DIAS DA SILVA *et al.*, 2020), na revista *Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications*; sendo seu título **Computational Modeling of Magnetic Field Optical Fiber Sensor Considering Temperature Effects** (SILVA, A. A. D. Da *et al.*, 2023) e na conferência do MOMAG 2020; com o título de **Modelagem Computacional de Sensor de Campo Magnético à Fibra Óptica Considerando Efeitos de Temperatura**. No mais, a metodologia desenvolvida nas simulações para a caracterização desse trabalho, contribuiu para o desenvolvimento da modelagem de outros sensores do grupo, que também necessitam observar a polarização do sinal.

Por fim, são listadas como continuação dos trabalhos apresentados nesta tese as atividades a seguir:

- A partir dos resultados obtidos, nota-se que o efeito de etalon pode ser usado para compensar efeitos de temperatura na constante magneto-óptica do

material. Assim, alterando o material refletor do transdutor tipo I, o alumínio, por outro material refletor, é possível obter uma estabilidade maior do sinal, para atuação em regiões com variações de temperatura.

- Montar o transdutor usando o Ce:YIG como material magnético para obtenção de resultados experimentais.
- Colocar duas Cabeças sensoras formadas com Ce:YIG, sendo uma otimizada para medir temperatura e outra para medir campo magnético, assim através da medida cruzada dos dois sinais refletidos nas duas cabeças, obter os valores de temperatura e campo magnético simultaneamente.
- Melhorar a estabilidade do sistema. Isso pode ser feito colocando o cabo de fibra óptica com um dos lados clivado e o outro lado ainda com conector para deposição, dessa forma eliminaria o ruído devido a emenda feita na máquina de fusão.
- Modificar a configuração com que o material magnético é depositado, afim de diminuir a magnetização remanescente na camada de material magnético.
- Testar novos materiais que se adequem mais a finalidade de usar o sistema para sensoramento.
- Investigar como efeitos de corrosão na camada magnética podem afetar a magnetização do material e a resposta do sistema.
- Investir na abordagem da utilização do sistema para caracterização de materiais.
- Trabalhar na construção experimental do controlador de polarização modelado e proposto nesta tese.

REFERÊNCIAS

- BAO, L. *et al.* Magnetic Field Sensor Based on Magnetic Fluid-Infiltrated Phase-Shifted Fiber Bragg Grating. **IEEE Sensors Journal**, 15 May. 2018. v. 18, n. 10, p. 4008–4012.
- BLASIAK, B. *et al.* An RF breast coil for 0.2TMRI. **Concepts in Magnetic Resonance Part B: Magnetic Resonance Engineering**, 12 Nov. 2015. v. 46, n. 1, p. 3–7.
- CAREY, R.; THOMAS, B. W. J. The theory of the Voigt effect in ferromagnetic materials. **Journal of Physics D: Applied Physics**, 21 Nov. 1974. v. 7, n. 17, p. 2362–2368. . Acesso em: 28 oct. 2023.
- CHEN, F. *et al.* A high-finesse fiber optic Fabry–Perot interferometer based magnetic-field sensor. **Optics and Lasers in Engineering**, Aug. 2015. v. 71, p. 62–65.
- CHEN, Y. *et al.* Optical fiber magnetic field sensor based on single-mode–multimode–single-mode structure and magnetic fluid. **Optics Letters**, 3 Oct. 2013. v. 38, n. 20, p. 3999.
- COMSOL, M. Wave Optics Module. [S.l.]: Revista COMSOL, 2015.
- DIAS DA SILVA, A. A. *et al.* Computational Modeling of Optical Fiber-Based Magnetic Field Sensors Using the Faraday and Kerr Magneto-optic Effects. **IEEE Transactions on Magnetics**, Sep. 2020. v. 56, n. 9, p. 1–9.
- ELSAYED ABDELAAL, S. M., Breaching of Coastal Barriers under Extreme Storm Surges and Implications for Groundwater Contamination. 2017.
- GOTO, T.; ONBAŞLÖ, M. C.; ROSS, C. A. Magneto-optical properties of cerium substituted yttrium iron garnet films with reduced thermal budget for monolithic photonic integrated circuits. **Optics Express**, 7 Dec. 2012. v. 20, n. 27, p. 28507.
- HAIDER, T. A review of magneto-optic effects and its application. **Int. J. Electromagn. Appl**, v. 7, n. 1, p. 17-24, 2017.
- HAUS, Jörg. **Optical sensors: basics and applications**. John Wiley & Sons, 2010.
- HOTT, M.; HOEHER, P. A.; REINECKE, S. F. Magnetic Communication Using High-Sensitivity Magnetic Field Detectors. **Sensors**, 4 Aug. 2019. v. 19, n. 15, p. 3415.
- HUANG, Z. *et al.* Fiber polarization control based on a fast locating algorithm. **Applied Optics**, 13 Sep. 2013. v. 52, n. 27, p. 6663.
- JINKUI CHU *et al.* Integrated Polarization Dependent Photodetector and Its Application for Polarization Navigation. **IEEE Photonics Technology Letters**, Mar. 2014. v. 26, n. 5, p. 469–472.
- KEBRITI, R.; HOSSIENI, S. M. H. 3D modeling of winding hot spot temperature in oil-

immersed transformers. **Electrical Engineering**, 13 Apr. 2022. v. 104, n. 5, p. 3325–3338.

KIM, J.-W.; PARK, S. Magnetic Flux Leakage Sensing and Artificial Neural Network Pattern Recognition-Based Automated Damage Detection and Quantification for Wire Rope Non-Destructive Evaluation. **Sensors**, 2 Jan. 2018. v. 18, n. 1, p. 109.

KIMEL, A. *et al.* The 2022 magneto-optics roadmap. **Journal of Physics D: Applied Physics**, 28 Sep. 2022. v. 55, n. 46, p. 463003.

KRINCHIK, G. S.; ARTEMJEV, V. A. Magneto-optic Properties of Nickel, Iron, and Cobalt. **Journal of Applied Physics**, 1 Feb. 1968. v. 39, n. 2, p. 1276–1278.

KUMARI, S.; CHAKRABORTY, S. Study of different magneto-optic materials for current sensing applications. **Journal of Sensors and Sensor Systems**, 13 Jun. 2018. v. 7, n. 1, p. 421–431.

LENZ, J.; EDELSTEIN, S. Magnetic sensors and their applications. **IEEE Sensors Journal**, Jun. 2006. v. 6, n. 3, p. 631–649.

LI, Y. *et al.* All-fiber-optic vector magnetic field sensor based on side-polished fiber and magnetic fluid. **Optics Express**, 15 Nov. 2019. v. 27, n. 24, p. 35182.

LIU, Heliang; OR, S. W.; TAM, H. Y. Magnetostrictive composite–fiber Bragg grating (MC–FBG) magnetic field sensor. **Sensors and Actuators A: Physical**, Jan. 2012. v. 173, n. 1, p. 122–126.

MANSURIPUR, M. The Faraday Effect. **Optics and Photonics News**, 1 Nov. 1999. v. 10, n. 11, p. 32.

MARCUSE, D. Gaussian approximation of the fundamental modes of graded-index fibers. **Journal of the Optical Society of America**, 1 Jan. 1978. v. 68, n. 1, p. 103.

MARTINELLI, M.; MARTELLI, P.; PIETRALUNGA, S. M. Polarization Stabilization in Optical Communications Systems. **Journal of Lightwave Technology**, Nov. 2006. v. 24, n. 11, p. 4172–4183.

Martins-Filho, J. F. *et al.* “Fiber-optic-based Corrosion Sensor using OTDR,” 2007. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1109/icsens.2007.4388616>>. Acesso em Jul. 20, 2021.

MAXWELL, J. C. A treatise on electricity and magnetism. **Clarendon press**, 1873.

MÉNDEZ, A.; MORSE, T. F. **Specialty Optical Fibers Handbook**, Elsevier, 2007.

MO, X. *et al.* A Magnetic Field SPR Sensor Based on Temperature Self-Reference. **Sensors**, 13 Sep. 2021. v. 21, n. 18, p. 6130. . Acesso em: 11 sep. 2023.

ONBASLI, M. C. *et al.* Optical and magneto-optical behavior of Cerium Yttrium Iron Garnet thin films at wavelengths of 200–1770 nm. **Scientific Reports**, 30 Mar. 2016. v. 6, n. 1.

ORDAL, M. A. *et al.* Optical properties of fourteen metals in the infrared and far infrared: Al, Co, Cu, Au, Fe, Pb, Mo, Ni, Pd, Pt, Ag, Ti, V, and W. **Applied Optics**, 15 Dec. 1985. v. 24, n. 24, p. 4493.

PANG, F. *et al.* The Orbital Angular Momentum Fiber Modes for Magnetic Field Sensing. **IEEE Photonics Technology Letters**, 1 Jun. 2019. v. 31, n. 11, p. 893–896.

PENDÃO, C.; SILVA, I. Optical Fiber Sensors and Sensing Networks: Overview of the Main Principles and Applications. **Sensors**, 5 Oct. 2022. v. 22, n. 19, p. 7554.

PENG ZU *et al.* Temperature-Insensitive Magnetic Field Sensor Based on Nanoparticle Magnetic Fluid and Photonic Crystal Fiber. **IEEE Photonics Journal**, Apr. 2012. v. 4, n. 2, p. 491–498.

PHOENIX, J. *et al.* Full polarization control of fiber-delivered light in a dilution refrigerator. **Review of Scientific Instruments**, 1 Ago. 2020. v. 91, n. 8.

POLYCARPOU, A. **Introduction to the Finite Element Method in Electromagnetics**. [S.l.]: Springer Nature, 2022.

QIU, Z. Q.; BADER, S. D. Surface magneto-optic Kerr effect. **Review of Scientific Instruments**, 1 Mar. 2000. v. 71, n. 3, p. 1243–1255.

RAKIĆ, A. D. *et al.* Optical properties of metallic films for vertical-cavity optoelectronic devices. **Applied Optics**, 1 Aug. 1998. v. 37, n. 22, p. 5271.

RIZAL, C.; SHIMIZU, H.; MEJÍA-SALAZAR, J. R. Magneto-Optics effects: New trends and future prospects for technological developments. **Magnetochemistry**, 24 Aug. 2022. v. 8, n. 9, p. 94.

SADIKU, M. N. O. **Elementos de Eletromagnetismo**. 3. ed. Porto Alegre: Bookman, 2004.

SATO, K.; ISHIBASHI, T. Fundamentals of Magneto-Optical Spectroscopy. **Frontiers in Physics**, 11 Oct. 2022. v. 10.

SHI, Y. *et al.* Theory and Application of Magnetic Flux Leakage Pipeline Detection. **Sensors**, 10 Dec. 2015. v. 15, n. 12, p. 31036–31055.

SHOJI, Y.; NEMOTO, T.; MIZUMOTO, T. “Measurement of Ce:YIG temperature dependence for temperature insensitive silicon waveguide optical isolator,” Dez. 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1109/ipcon.2014.6995278>>. acesso em Jul. 05, 2021.

SILVA, A. A. D. *Modelagem computacional usando método de elementos finitos para aplicação em ensino de eletrostática*. 2016. Trabalho de conclusão de curso (Graduação) - Núcleo de Formação Docente. Universidade Federal de Pernambuco, Campus Agreste, 2016. 70 f.

SILVA, A. A. D. Da et al. Computational Modeling of Magnetic Field Optical Fiber Sensor Considering Temperature Effects. **Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications**, Mar. 2023. v. 22, n. 1, p. 91–100.

SILVA, R. M. *et al.* Optical Current Sensors for High Power Systems: A Review. **Applied Sciences**, 2 Jul. 2012. v. 2, n. 3, p. 602–628.

SUN, B. *et al.* High-sensitivity and low-temperature magnetic field sensor based on tapered two-mode fiber interference. **Optics Letters**, 12 Mar. 2018. v. 43, n. 6, p. 1311.

SUN, L.; JIANG, S.; MARCIANTE, J. R. All-fiber optical magnetic-field sensor based on Faraday rotation in highly terbium-doped fiber. **Optics Express**, 1 Mar. 2010. v. 18, n. 6, p. 5407.

THORLABS, 3-Paddle Polarization Controllers, Disponível em: <https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=343>. acesso em Jul. 05, 2023.

TIKUIŠIS, K. K. *et al.* OPTICAL AND MAGNETO-OPTICAL PROPERTIES OF PERMALLOY THIN FILMS IN 0.7–6.4 eV PHOTON ENERGY RANGE. **Materials & Design**, Jan. 2017. v. 114, p. 31–39.

WANG, H. *et al.* Magnetic field sensing based on singlemode–multimode–singlemode fiber structures using magnetic fluids as cladding. **Optics Letters**, 19 Sep. 2013. v. 38, n. 19, p. 3765.

YANG, M. *et al.* Optical fiber magnetic field sensors with TbDyFe magnetostrictive thin films as sensing materials. **Optics Express**, 28 Oct. 2009. v. 17, n. 23, p. 20777.

YIN, J. *et al.* All-fiber-optic vector magnetometer based on nano-magnetic fluids filled double-clad photonic crystal fiber. **Sensors and Actuators B: Chemical**, Jan. 2017. v. 238, p. 518–524.

YU, Q. *et al.* Temperature Compensated Magnetic Field Sensor Using Magnetic Fluid Filled Exposed Core Microstructure Fiber. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, 2022. v. 71, p. 1–8.

ZAK, J. *et al.* Universal approach to magneto-optics. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, Sep. 1990. v. 89, n. 1–2, p. 107–123.

ZHANG, J. *et al.* Fiber structures and material science in optical fiber magnetic field sensors. **Frontiers of Optoelectronics**, 10 Aug. 2022. v. 15, n. 1.

ZHANG, P. *et al.* An Ultra-Sensitive Magnetic Field Sensor Based on Extrinsic Fiber-Optic Fabry–Perot Interferometer and Terfenol-D. **Journal of Lightwave Technology**, 1 Aug. 2015. v. 33, n. 15, p. 3332–3337.

ZHENG, Y. *et al.* Fiber Optic Fabry–Perot Optofluidic Sensor With a Focused Ion Beam Ablated Microslot For Fast Refractive Index and Magnetic Field Measurement. **IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics**, Mar. 2017. v. 23, n. 2, p. 322–326.

ZÍLIO, Sérgio Carlos. **Óptica moderna**: fundamentos e aplicações. 2009.

APÊNDICE A - CÓDIGO DO PROGRAMA FEITO EM LINGUAGEM MATLAB, PARA A MODELAGEM ANALÍTICA

```
teta = 45; %ângulo de polarização
d1 = 50e-9; %espessura do ferro
lam = 1.55e-6; %comprimento de onda
```

```
%índices de refração
n1 = 1.44401; %sílica
%n2 = 2.25 + 1i*8.3e-5; %Ce:YIG
n2 = 3.65 + 1i*5.6; %ferro
%n3 = 1.5785 + 15.658i; %aluminio
n3 = 1;
```

```
%constante magneto-óptica
%Q1 = 2.41e-2 - 1i*8.90e-7;
Q1 = 0.051 - 1i*0.063;
```

```
for b1=1:21
    b=(b1-11)/10;
    bb(b1)=(b1-11)/10;
```

```
Qb1 = b*Q1; %sílica
Qb2 = b*Q2; %ferro
```

```
%parametros
C1 = cos(2*pi*n2*d1/lam);
S1 = sin(2*pi*n2*d1/lam);
SIG1 = pi*n2*Qb1*d1/lam;
B1 = 1i*SIG1*S1;
F1 = 1i*S1/n2;
J1 = 1i*S1*n2;
```

```

E1 = Qb1*S1/(2*n2) - C1*SIG1/n2;
H1= Qb1*n2*S1/2 + n2*SIG1*C1;

%matrizes
M1 = [1 0 1 0;0 1 0 -1;0 -n1 0 -n1;n1 0 -n1 0];
M2 = [C1 -B1 E1 -F1;B1 C1 F1 E1;H1 J1 C1 -B1;-J1 H1 B1 C1];
M3 = [1 0 1 0;0 1 0 -1;0 -n3 0 -n3;n3 0 -n3 0];

M = inv(M1)*M2*M3;
G = M(1:2,1:2);
I = M(3:4,1:2);
RE = I*inv(G);

%coeficientes de reflexão
rpp = RE(1,1);
rps = RE(1,2);
rsp = RE(2,1);
rss = RE(2,2);

%reflectancia
arg = teta*pi/180;
Er = RE*[sin(arg); cos(arg)];

Er1(b1) = abs(Er(1,1))^2; %onda p
Er2(b1) = abs(Er(2,1))^2; %onda s
angle =
sqrt(abs(Er(2,1))^2)/sqrt(abs(Er(2,1))^2+abs(Er(1,1))^2);
angle1(b1)= cos(angle)^2;
angle2(b1)=real(rps/rpp)*180/pi;
angle3(b1)=real(rsp/rss)*180/pi;

end

```

```

Erd=[bb',Er1',Er2'];
anglee=[bb',angle1'];

hold on
figure(1)
plot(bb,Er1,bb,Er2);
legend('Er1','Er2');
hold on
figure(2)
plot(bb,angle1);
legend('1');
hold on
figure(3)
plot(bb,angle2,bb,angle3)
legend('2','3')

save('YIG_aluminioxb.txt','Erd','-ascii')
save('anglerad.txt','anglee','-ascii')

```

APÊNDICE B – CÓDIGO DE PROGRAMA EM PYTHON PARA AUTOMATIZAÇÃO DO SISTEMA

#importando as bibliotecas utilizadas no código

```
import pyvisa
import time
import numpy as np
```

#criando os objetos que irão receber os equipamentos

```
rm = pyvisa.ResourceManager()
rm1 = pyvisa.ResourceManager()
print(rm1.list_resources())
```

#conectando a fonte de corrente

```
psu = rm1.open_resource('GPIB0::6::INSTR')
```

```
corrente = 0
```

#setando as configurações de tempo em que as medidas serão feitas

```
tempo = 10 #tempo segundos
delay = 1 #tempo entre as medidas em segundos
93edidas = tempo/delay
medidas = int(93edidas)
print(medidas)
```

#configurando a fonte de corrente

```
psu.write("*CLS")
psu.write("*RST")
```

```

psu.write("OUTP ON")
psu.write('FUNC:MODE CURR')
psu.write('CURR %d' % corrente)
psu.write("OUTP OFF")
time.sleep(10)

```

#conectando o multímetro

```

v34401A = rm.open_resource('GPIB0::22::INSTR')
voltagens=[0 for ab in range(medidas)]
ReturnValue = v34401A.query('*IDN?')
v34401A.write('FUNC "VOLT:DC')
v34401A.write('VOLT:DC:RANGE 'AUTO 'N')

```

#coletando as medidas

```

for i in range(medidas):
    vtagem = v34401A.query_ascii_values('MEASure:VOLTage:DC?')
    voltagens[i] = vtagem[0]
    time.sleep(delay)

```

#fechando todos os equipamentos

```

v34401A.close() # Close our connection to the instrument
rm.close()
psu.close()
rm1.close()

```

#tirando media e desvio padrão das medias

```

media=[0]
media[0]=np.mean(voltagens)
dp=[0]
dp [0]=np.std(voltagens)

```

#imprimindo os dados

```
print(voltagens)
np.savetxt(f'voltagens{corrente}.txt', voltagens)
np.savetxt(f'media{corrente}.txt', media)
np.savetxt(f'dp{corrente}.txt', dp)
```

APÊNDICE C – LISTA DE PUBLICAÇÕES

Artigo científico publicados em periódicos

1. **DA SILVA, ALLAMYS A. DIAS**; ALVES, HENRIQUE P.; MARCOLINO, FELIPE C.; NASCIMENTO, JEHAN F.; MARTINS-FILHO, JOAQUIM F. Computational Modeling of Optical Fiber based Magnetic Field Sensors using Faraday and Kerr Magneto-Optic Effects. IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS. , v.online, p.1 - 1, 2020.
2. **SILVA, ALLAMYS A. DIAS DA**; OLIVEIRA, Hebio J. B.; ALVES, HENRIQUE P.; NASCIMENTO, JEHAN FONSÊCA DO; MARTINS FILHO, JOAQUIM F. Computational Modeling of Magnetic Field Optical Fiber Sensor Considering Temperature Effects. JOURNAL OF MICROWAVES, OPTOELECTRONICS AND ELECTROMAGNETIC APPLICATIONS. , v.22, p.91 - 100, 2023.
3. OLIVEIRA, HEBIO; **SILVA, ALLAMYS**; PEIXOTO E SILVA, MARIANNE; ALVES, HENRIQUE; NASCIMENTO, JEHAN; MARTINS-FILHO, JOAQUIM. Refractive Index Sensors Based on Cascaded Multimode Interference Hetero-core Optical Fibers. APPLIED OPTICS. , v.early, p.1 - 10, 2023.

Trabalhos ou publicações em anais de congressos científicos

1. ALVES, HENRIQUE P.; BARROS, THALES H. C.; **DA SILVA, ALLAMYS A. DIAS**; COELHO, Leonardo D.; MARTINS-FILHO, JOAQUIM F. Modulador Eletro-Óptico Integrado à Fibra de Perfil D In: 20º Simpósio Brasileiro de Micro-onda e Optoeletrônica, 2022, Natal.
Anais do SBMO 2022. , 2022. v.1. p.1 - 5
2. OLIVEIRA, Hebio J. B.; **DA SILVA, ALLAMYS A. DIAS**; PEIXOTO E SILVA, MARIANNE STELY; NASCIMENTO, Jehan F.; MARTINS-FILHO, JOAQUIM F. Sensor de Índice de Refração Baseado em Fibras Ópticas Heteronúcleo em Cascata Multiplexado em Comprimento de Onda In: 20º Simpósio Brasileiro de Micro-ondas e Optoeletrônica, 2020, Natal.

Anais do SBMO 2022. , 2022. v.1. p.1 - 5

3. **SILVA, A. A. D.**; OLIVEIRA, H. J. B.; ALVES, H. P.; NASCIMENTO, J. F.; MARTINS-FILHO, J. F.

Modelagem Computacional de Sensor de Campo Magnético à Fibra Óptica Considerando Efeitos de Temperatura In: MOMAG 2020 - 19º SBMO - Simpósio Brasileiro de Micro-ondas e Optoeletrônica e 14º CBMag - Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo, 2020, Niteroi.

MOMAG. , 2020.

4. OLIVEIRA, H. J. B.; **SILVA, A. A. D.**; NASCIMENTO, J. F.; MARTINS-FILHO, J. F.
Sensor de Índice de Refração à Fibra Óptica Heteronúcleo com Estrutura MSM In: MOMAG 2020 - 19º SBMO - Simpósio Brasileiro de Micro-ondas e Optoeletrônica e 14º CBMag - Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo, 2020, Niteroi.

MOMAG. , 2020.