



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ**  
**INSTITUTO DE TECNOLOGIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**TESE DE DOUTORADO**

**Caracterização e desenvolvimento de sensores ópticos de corrente elétrica para aplicações em linhas de alta tensão**

**ANGELA COSTA SANTA BRÍGIDA**

UFPA / ITEC / PPGEE  
Campus Universitário do Guamá  
Belém-Pará-Brasil  
2017





**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ**  
**INSTITUTO DE TECNOLOGIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**ANGELA COSTA SANTA BRÍGIDA**

**Caracterização e desenvolvimento de sensores ópticos de corrente elétrica para aplicações em linhas de alta tensão**

Tese de doutorado apresentada como exigência para obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica, elaborada sob a orientação do Prof. Dr. João Crisóstomo Weyl Albuquerque Costa.

UFPA /ITEC / PPGEE  
Campus Universitário do Guamá  
Belém-Pará-Brasil  
2017

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)  
Sistema de Bibliotecas da UFPA

---

Santa Brígida, Angela Costa, 1979-

Caracterização e desenvolvimento de sensores ópticos de corrente elétrica para aplicações em linhas de alta tensão / Angela Costa Santa Brígida.— 2017.

Orientador: João Crisóstomo Weyl Albuquerque Costa

Dissertação (doutorado) – Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Belém, 2017.

1. Detectores de fibras óticas. 2. Energia elétrica-Distribuição-Alta tensão. 3. Faraday, Efeito de. I. Título.

CDD 22. ed. 681.25

---

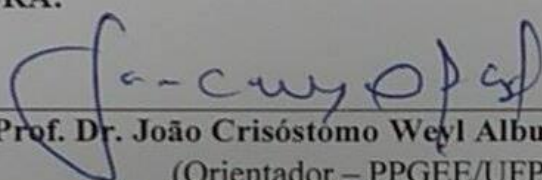
**“CARACTERIZAÇÃO E DESENVOLVIMENTO DE SENSORES ÓPTICOS DE  
CORRENTE ELÉTRICA PARA APLICAÇÕES EM LINHAS DE ALTA TENSÃO”**

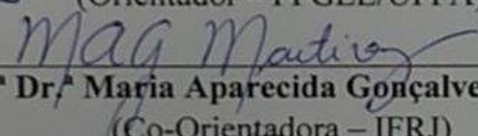
**AUTOR: ANGELA COSTA SANTA BRÍGIDA**

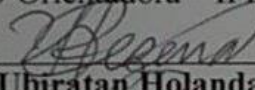
TESE DE DOUTORADO SUBMETIDA À BANCA EXAMINADORA APROVADA PELO  
COLEGIADO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA, SENDO  
JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTORA EM ENGENHARIA  
ELÉTRICA NA ÁREA DE TELECOMUNICAÇÕES.

APROVADA EM: 03/04/2017

**BANCA EXAMINADORA:**

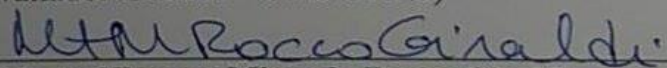
  
\_\_\_\_\_  
**Prof. Dr. João Crisóstomo Weyl Albuquerque Costa**  
(Orientador – PPGEE/UFPA)

  
\_\_\_\_\_  
**Prof.ª Dr.ª Maria Aparecida Gonçalves Martinez**  
(Co-Orientadora – IFRJ)

  
\_\_\_\_\_  
**Prof. Dr. Ubiratan Holanda Bezerra**  
(Avaliador Interno – PPGEE/UFPA)

\_\_\_\_\_  
**Prof. Dr. Petrus Agrippino de Alcântara Júnior**  
(Avaliador Externo ao Programa – ICEN/UFPA)

\_\_\_\_\_  
**Prof. Dr. Pedro Alberto da Silva Jorge**  
(Avaliador Externo – UNIPORTO)

  
\_\_\_\_\_  
**Prof.ª Dr.ª Maria Thereza Miranda Rocco Giraldi**  
(Avaliadora Externa – IME)

\_\_\_\_\_  
**Prof.ª Dr.ª Maria José Pontes**  
(Avaliadora Externa – UFES)

**VISTO:**

\_\_\_\_\_  
**Prof. Dr. Evaldo Gonçalves Pelaes**  
(Coordenador do PPGEE/ITEC/UFPA)

Entre a Áustria e a Itália, há uma parte dos Alpes chamada Semmering. É uma parte incrivelmente difícil de subir, muito alto das montanhas. Eles construíram um trilho nestes Alpes para ligar Viena e Veneza, mesmo antes de existir um trem que pudesse fazer a viagem. Mas eles construíram porque sabiam que, algum dia, o trem chegaria.

*Sob o Sol da Toscana*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por nunca ter me abandonado.

Aos meus pais, irmãs e sobrinhas, pelo amor incondicional, apoio e incentivo para realizar essa importante e longa jornada e pela compreensão de minha ausência em diversos momentos e que sempre estiveram incansáveis cuidando do meu “Portuga” Gabriel Santa Brígida.

Aos meus braços, esquerdo e direito (como eu costumava dizer): Paulo e Cledson (querido Espos) que me apoiaram no momento mais crítico desta jornada e a Ana Cláudia pela correção desta Tese.

Aos meus orientadores, Prof. Dr. João Crisóstomo Weyl A. Costa e Prof<sup>a</sup>. Dra. Maria Aparecida Gonçalves Martinez, pela orientação, confiança, paciência, conselhos e palavras motivadoras nos momentos difíceis e por todo o apoio e suporte oferecido para que a elaboração dessa tese fosse possível.

Ao Dr. Pedro Jorge, pela orientação do meu trabalho durante meu estágio de doutorado sanduíche no INESC TEC - Instituto de Engenharia de Sistemas e Computadores, Tecnologia e Ciência, em Portugal e aos pesquisadores do INESC TEC que muito me ajudaram no aprendizado e realização de experimentos em laboratório, em especial ao Ivo Nascimento.

Aos integrantes do Laboratório de Eletromagnetismo Aplicado (LEA), em especial à secretária Liane Barbosa, pelo competente e dedicado apoio logístico.

À SEDUC – Secretaria de Educação, à CAPES - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível superior e ao CNPq - Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico pelo apoio financeiro.

À ANEEL pelo apoio através do programa de pesquisa e desenvolvimento das companhias do grupo TBE - Transmissoras Brasileiras de Energia (EATE - Empresa Amazonense de Transmissão de Energia, ECTE - Empresa Catarinense de Transmissão de Energia, ENTE - Empresa Norte de Transmissão de Energia, ERTE – Empresa Regional de Transmissão de Energia, ETEP – Empresa Paraense de Transmissão de Energia, LUMITRANS - Companhia Transmissora de Energia Elétrica e STC - Sistemas de Transmissão Catarinense).

E a todos que colaboraram indiretamente também, o meus sinceros MUITO OBRIGADA!

# ÍNDICE

<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>IX</b>
<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>XI</b>
<b>LISTA DE ABREVIATURAS.....</b>	<b>XII</b>
<b>RESUMO.....</b>	<b>XIV</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>XV</b>
<b>1 Introdução.....</b>	<b>1</b>
1.1. Motivação.....	1
1.2. Objetivos.....	3
1.3. Metodologia.....	3
1.4. Conceitos Fundamentais.....	4
1.4.1 Polarização.....	5
1.4.2 Birrefringência.....	8
1.4.3 Formalismo matricial de Jones.....	9
1.4.4 Efeito Faraday.....	9
1.4.5 Método de análise de sinal.....	11
1.5. Organização da Tese.....	15
<b>2 Estado da Arte.....</b>	<b>16</b>
2.1. Transformadores de medida de corrente convencional.....	16
2.1.1. Transformadores de corrente.....	18
2.2. Sensores ópticos de corrente elétrica.....	20
2.2.1. Prisma sensor de SF57.....	21
2.2.2. Sensores em fibra.....	23
2.2.3. Sensores de campo magnético.....	27
2.2.4. Sensores híbridos.....	27
2.3. Principais sensores comerciais.....	28
<b>3 Prisma Sensor de SF57.....</b>	<b>33</b>
3.1. Rotação de Faraday do sensor.....	34
3.2. Função de transferência do sensor.....	37
3.3. Caracterização do sensor.....	38
3.3.1. Sensibilidade em relação ao ângulo entre entrada e saída polarizada.....	39
3.3.2. Resposta do sensor como função de frequência.....	41
3.3.3. Largura de banda do sensor.....	43
3.3.4. Sensibilidades e resolução obtidas em diferentes comprimento de onda.....	44
<b>4 Protótipo do prisma sensor de SF57 .....</b>	<b>48</b>
4.1. Prisma sensor .....	48
4.2. Encapsulamento do sensor óptico.....	49
4.3. Unidade de Interrogação.....	52
4.4. Calibração do sensor.....	54
4.5. Detecção de transientes.....	56
4.6. Dependência da temperatura.....	58
<b>5 Sensor de corrente a fibra .....</b>	<b>59</b>
5.1. Requisitos da fibra óptica para utilização como sensor de corrente elétrica.....	59
5.2. Amostras de fibra.....	62
5.3. Caracterização do sensor em fibra.....	63
5.4. Resultados e discussão.....	65
5.5. Análise Numérica.....	69
5.5.1. Sensibilidade relativa.....	70



5.5.2. Enrolamento e Curvatura.....	72
5.5.3. Sensibilidade Total.....	74
<b>6 Conclusão e Propostas de Trabalhos Futuros.....</b>	<b>78</b>
6.1. Propostas de Trabalhos Futuros.....	79
6.2. Produções científicas.....	80
6.2.1. Artigos em Revistas Científicas Internacionais.....	80
6.2.2. Trabalhos publicados em anais de eventos (completo).....	80
6.2.3. Trabalhos publicados em anais de eventos (resumo).....	81
6.2.4. Apresentação Oral de Trabalhos em eventos (resumo).....	82
<b>Referências Bibliográficas.....</b>	<b>83</b>
<b>Apêndice A – Rotação de Faraday.....</b>	<b>92</b>
<b>Apêndice B – Montagem do Protótipo.....</b>	<b>97</b>

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.1 -</b>	Onda plana se propagando no eixo z, tendo polarização na direção x.	5
<b>Figura 1.2 -</b>	Representação dos tipos dos casos de polarização linear.	6
<b>Figura 1.3 -</b>	Representação das polarizações circular direita (a) e esquerda (b).	7
<b>Figura 1.4 -</b>	Representação da polarização elíptica.	7
<b>Figura 1.5 -</b>	Diagrama ilustrando uma onda plana linearmente polarizada formando um ângulo $\theta$ em relação ao eixo óptico do meio (na direção y). A onda incide em um meio birrefringente onde as componentes extraordinárias (E) e ordinária (O) são indicadas.	8
<b>Figura 1.6 -</b>	Esquema básico da medição da rotação do estado de polarização.	12
<b>Figura 1.7 -</b>	Função de transferência de dois polarizadores consecutivos mostrando a potência transmitida como uma função do seu ângulo relativo.	13
<b>Figura 1.8 -</b>	Esquema de detecção polarimétrica em dupla quadratura.	14
<b>Figura 2.1 -</b>	O Transformador de Stanley.	16
<b>Figura 2.2 -</b>	Transformador de núcleo de ferro, caso ideal.	17
<b>Figura 2.3 -</b>	(a) Prisma sensor com dupla reflexão. (b) Prisma sensor com formato triangular.	21
<b>Figura 2.4 -</b>	Sensor de fibra óptica em volta de um condutor.	24
<b>Figura 2.5 -</b>	Espelho de Faraday.	25
<b>Figura 2.6 -</b>	MOCT da ABB.	29
<b>Figura 2.7 -</b>	FOCS da ABB.	30
<b>Figura 2.8 -</b>	COSI-CT da NxtPhase.	31
<b>Figura 2.9 -</b>	FOECT-3000 da AIRAK.	31
<b>Figura 2.10 -</b>	DISCOS da POWERSENSE	32
<b>Figura 3.1 -</b>	Esquemas representando a configuração do prisma sensor de corrente em dupla quadratura.	34
<b>Figura 3.2 -</b>	Simetria do sistema para aplicação da Lei de Ampère.	35
<b>Figura 3.3 -</b>	Representação do campo magnético na proximidade do condutor, sendo L o comprimento do prisma.	35
<b>Figura 3.4 -</b>	Fotografia da montagem experimental.	39
<b>Figura 3.5 -</b>	Derivada da saída do sinal em função do ângulo entre polarizadores para diferentes fontes ópticas utilizadas para iluminar o sensor.	40
<b>Figura 3.6 -</b>	Fonte SLD 830nm medidos a 40dB. Variação da tensão de pico a 80 Hz para sete incrementos sucessivos de aproximadamente $71 A_{RMS}$ .	41
<b>Figura 3.7 -</b>	Calibração do sensor entre os 0A e os 500A.	42
<b>Figura 3.8 -</b>	Resposta do sensor em função da corrente obtida para diferentes frequências entre 50Hz e 400 Hz.	42
<b>Figura 3.9 -</b>	Sensibilidade do sensor para várias fontes ópticas.	45
<b>Figura 3.10 -</b>	Resolução do sensor para várias fontes ópticas.	46
<b>Figura 4.1 -</b>	Configuração para medição do campo magnético	48
<b>Figura 4.2 -</b>	Encapsulamento do sensor em (a) e o prisma sensor em (b)	51
<b>Figura 4.3 -</b>	Encapsulamento do sensor (a) vista externa e (b) vista interna	51
<b>Figura 4.4 -</b>	(a) Esquemático e (b) foto da unidade de interrogação no interior	52
<b>Figura 4.5 -</b>	Sistema de aquisição vista de (a) frente e de (b) costa	53
<b>Figura 4.6 -</b>	Captura de tela do painel frontal do programa LabVIEW desenvolvido para a unidade de interrogação do sensor de corrente óptica.	54
<b>Figura 4.7 -</b>	Classificação de protótipos de acordo com classes de precisão de medição.	55

<b>Figura 4.8 -</b>	Erro de precisão do sensor nas classes de precisão de medição 0,2 e 0,1, considerando correntes nominais de 300 $A_{RMS}$ e 1200 $A_{RMS}$ .	56
<b>Figura 4.9 -</b>	(a) Sinal de saída do sensor ao ligar o condutor com 300 $A_{RMS}$ e em (b) um zoom dos pulsos de transientes detectados.	57
<b>Figura 5.1 -</b>	Evolução do estado de polarização da luz no interior de uma fibra óptica. O comprimento de batimento é o comprimento necessário para que a polarização retorne ao estado inicial.	60
<b>Figura 5.2 -</b>	Sessão transversal para cada fibra PCF e correspondente perfil do modo a 633 nm [Fonte: LaF-UNICAMP].	63
<b>Figura 5.3 -</b>	Fotografia da montagem experimental em (a) e dos suportes para enrolar a fibra em (b)	64
<b>Figura 5.4 -</b>	Sensor de corrente elétrica.	64
<b>Figura 5.5 -</b>	(a) Resposta do sensor para diferentes incrementos na corrente aplicada e (b) calibração para a fibra PCF com diferentes torções.	66
<b>Figura 5.6 -</b>	Sensibilidade do sensor em função do número de voltas ao redor do condutor de diâmetros (a) 18cm, (b)12 cm e (c) 6 cm.	68
<b>Figura 5.7 -</b>	(a) Sensibilidade normalizada m função da razão entre o período circular ( $L_T$ ) e o comprimento de batimento linear ( $L_P$ ). (b) Comprimento de batimento elíptico normalizado em função da razão entre o período circular ( $L_T$ ) e o comprimento de batimento linear ( $L_P$ ).	71
<b>Figura 5.8 -</b>	Geometria de uma fibra dobrada	72
<b>Figura 5.9 -</b>	Sensibilidade normalizada em função do diâmetro do suporte	73
<b>Figura 5.10 -</b>	(a) Sensibilidade total normalizada. (b) zoom na região entre 0 e 20 mm	75
<b>Figura 5.11 -</b>	Resposta à variação de corrente usando os suportes de 6cm em (a), 12cm em (b) e 18 cm em (c)	77

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1.1</b> -	Valores da constante de Verdet, operando com 633 nm	11
<b>Tabela 2.1</b> -	Transformadores de medidas adquiridos pela Eletrobrás Eletronorte	19
<b>Tabela 3.1</b> -	Matriz de Jones	37
<b>Tabela 3.2</b> -	Fontes de banda larga SLD e potências de saída	44
<b>Tabela 4.1</b> -	Lista de materiais analisados para suporte do sensor	50
<b>Tabela 5.1</b> -	Valores característicos das fibras, onde $\Delta\beta$ é a birrefringência linear e $\xi$ a birrefringência circular.	70

## LISTA DE ABREVIATURAS

ABB	<i>Asea Brown Boveri</i>
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ANSI	<i>American National Standards Institute</i>
ASE	<i>Amplified Spontaneous Emission</i>
BS	<i>Beam Splitter</i>
CA	Corrente alternada
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível superior
CC/DC	Corrente contínua
CNPq	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico pelo apoio financeiro
COSI	<i>Compact Optical Sensor Intelligence</i>
DAQ	<i>Data Acquisition</i>
DFB	<i>Distributed Feedback</i>
DSP	<i>Digital Signal Processing</i>
EATE	Empresa Amazonense de Transmissão de Energia
ECTE	Empresa Catarinense de Transmissão de Energia
ELN	Eletronorte – Centrais Elétricas do Norte do Brasil S/A
ENTE	Empresa Norte de Transmissão de Energia
EPE	Empresa de Pesquisas Energéticas
ERTE	Empresa Regional de Transmissão de Energia
ETEP	Empresa Paraense de Transmissão de Energia
FBG	<i>Fiber Bragg Grating</i>
FOCS	<i>Fiber Optical Current Sensor</i>
GRIN	<i>Gradient-index</i>
IEC	<i>Internacional Electro technical Commission standards</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
INESCTEC	Instituto de Engenharia de Sistemas e Computadores, Tecnologia e Ciência
LabView	<i>Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench</i>
LaFE	Laboratório de Fibras Especiais & Materiais Fotônico
LEA	Laboratório de Eletromagnetismo Aplicado
LUMITRANS	Companhia Transmissora de Energia Elétrica
MOCT	<i>Magneto Optical Current Transformer</i>
OPGW	<i>Optical Ground Wire</i>
PCF	<i>Photonic Crystal Fiber</i>
PBS	<i>Polarizing Beam Splitter</i>
RMS	<i>Root Mean Square</i>
Rps	Rotações por segundo
SEDUC	Secretaria de Educação
SLD	<i>Superluminescent diode</i>
SMF	<i>Single Mode Fiber</i>
STC	Sistemas de Transmissão Catarinense
TBE	Transmissoras Brasileiras de Energia
TC	Transformadores de corrente
TECCON	Tecnologia de sensores em fibras óptica para supervisão, controle e proteção de sistemas de energia
TI	Transformadores para instrumentos

TP Transformadores de potencial  
UFPA Universidade Federal do Pará  
UNICAMP Universidade de Campinas  
USB *Universal Serial Bus*

## RESUMO

Esta tese, intitulada “Caracterização e desenvolvimento de sensores ópticos de corrente elétrica para aplicações em linhas de alta tensão” foi desenvolvida no âmbito de um programa de doutorado em Engenharia Elétrica. Foram implementados e caracterizados sensores de corrente magneto-óptico, para aplicações de medição e proteção em sistemas de alta potência, nomeadamente, prisma sensor e sensor com fibra de cristal fotônico (PCF). Ambos, são baseados no efeito Faraday, utilizando uma configuração polarimétrica em dupla quadratura. Este trabalho foi, então, dividido, em dois momentos. No primeiro, um prisma sensor, constituído de uma cabeça sensora portátil para ancoragem na linha de transmissão foi desenvolvido, em Portugal, para uma aplicação industrial. Neste caso, no protótipo do prisma sensor foi utilizado um prisma de vidro Schott SF57 de 8cm de comprimento com alta constante de Verdet e baixa birrefringência. Ele foi incorporado em um invólucro de Nylon adequado para aplicações de fixação na linha de alimentação. A operação do sensor é caracterizada e comparada usando Diodos Super Luminescentes (SLD) distintos como fontes ópticas, com emissão a 650, 830 e 1550 nm. O sensor demonstrou precisão de classe 1, para correntes nominais iguais ou superiores a 900 A<sub>RMS</sub> e classes 0,1 e 0,2 para correntes nominais de 1,2 kA<sub>RMS</sub> e 0,3 kA<sub>RMS</sub>, respectivamente, e a possibilidade de detectar impulsos na rede abaixo dos 10 μs. Em um segundo momento, outra configuração envolveu o uso de fibras ópticas como elemento transdutor, empregando, fibras torcidas altamente birrefringente com 4,5, 6, 9, e 11 rotações por segundo, desenvolvidas pelo grupo do Laboratório de Fibras Especiais & Materiais Fotônico – LaFE, do Instituto de Física *Gleb Wataghin* da UNICAMP, no Brasil. Em particular, estas fibras foram testadas enrolando-as em torno de um condutor elétrico utilizando três tamanhos de enrolamento de 6, 12 e 18 cm de diâmetros com diferentes voltas, com correntes de até 800 A<sub>RMS</sub> usando uma fonte SLD a 650 nm. Parâmetros, tais como a sensibilidade e a linearidade do sensor, foram investigados. Uma simulação também foi realizada para analisar quantitativamente o valor da sensibilidade das fibras com relação ao número de voltas e com relação ao diâmetro do suporte, no qual foi concluído que deve haver um compromisso entre estes dois parâmetros afim de obter uma melhor resposta no sinal de saída do sensor.

**PALAVRAS-CHAVE:** Sensores de corrente magneto-ópticos, sensor Bulk, efeito Faraday, detecção polarimétrica, linhas de alta tensão, protótipo, Fibra de cristal fotônico.

## ABSTRACT

This thesis, titled "Characterization and development of electric sensors for electrical applications in high voltage lines" was developed in a PhD program in Electrical Engineering. Fix the devices and characterized the magneto-optical current sensors for measurement applications and protection in high power systems, namely, prism sensor and photonic glass fiber (PCF) sensor. Both are based on the Faraday effect, using a double quadrature polarimetric configuration. This work was then divided in two moments. In the first, a prism sensor, consisting of a portable sensor head for anchoring in the transmission line was developed, in Portugal, for an industrial application. In this case, no prism sensor prototype was used in a Schott SF57 glass prism 8cm in length with high Verdet constant and low birefringence. It has been incorporated into a Nylon casing suitable for fastening applications in the power line. The operation of the sensor is characterized and compared using Super Luminescent Diodes (SLD) as a source of 650, 830 and 1550 nm. Class 1 precision sensor for nominal currents of 900 A<sub>RMS</sub> or higher and classes 0,1 and 0,2 for nominal currents of 1,2 kA<sub>RMS</sub> and 0,3 kA<sub>RMS</sub>, respectively, and the possibility of detecting impulses in the network of 10 Ms. Second, another type of wrapping, the use of optical fibers as a transition element, using highly rotated fibers at 4, 6, 9, and 11 revolutions per second, developed by the group of the Laboratory of Special Fibers and Photonic Materials - LaFE, from the Institute of Physics *Gleb Wataghin* of UNICAMP, Brazil. In particular, these lines were tested as a whole on an electric conductor using three winding sizes of 6, 12 and 18 cm in diameters with different turns, with currents of up to 800 A<sub>RMS</sub> using an SLD source at 650 nm. Parameters, such as sensitivity and linearity of the sensor, were investigated. A symbolic analysis was also performed to quantitatively analyze the fiber sensitivity value with respect to the number of turns and with respect to the diameter of the support, there is no conclusion that there is a compromise between these two parameters in order to obtain a better response in the signal of sensor output.

**KEYWORDS:** Magneto-optical current sensors, Bulk optical glasses, Faraday effect, polarimetric detection, high power grids, prototype, Photonic crystal fiber.



# Introdução

## “Conta mais cara faz consumidor cortar gastos com energia”

Notícias como esta tem sido comuns nos últimos meses em jornais brasileiros e no mundo. A Empresa de Pesquisas Energéticas (EPE) ressalta que o expressivo aumento das tarifas fez com que o consumo nacional de energia no Brasil apresentasse uma queda, em geral, de 2,2% em maio de 2015 em comparação com o mesmo mês do ano anterior e de 0,9% em 2016 comparados com 2015 [1].

Os sistemas de transmissão e distribuição de energia dependem totalmente de transformadores de medida, que são equipamentos projetados e construídos com o objetivo de transferir sinais elétricos para instrumentos de medidas, operação, controle e proteção. Portanto, sua monitorização e gestão mais eficazes têm como consequência final a diminuição da tarifa da conta de energia cobrada ao consumidor.

É inerente ao ser humano buscar melhorias nos diversificados setores da vida em sociedade como indústria, transporte, educação e no que diz respeito a energia não é diferente. Neste contexto, engenheiros e cientistas empenham-se em otimizar os meios de geração de potência elétrica e, também, desenvolver novas tecnologias de equipamentos de medidas.

Assim, a procura por inovações tecnológicas implica em novas exigências, de modo que uma gestão mais eficiente dos recursos já existentes só se torna possível com uma monitorização intensa dos diversos parâmetros da rede como tensão, corrente, entre outros.

### 1.1. Motivação

A exigência pela busca do "eficiente" também se aplica na monitoração em tempo real de parâmetros elétricos que possibilitam caracterizar o fluxo de energia em redes elétricas e entender melhor sua operação, permitindo o desenvolvimento de sistemas de gerenciamento de

energia sustentável. Como será mostrado no Capítulo 2, a tecnologia tradicional de transformadores de corrente elétrica (TCs) é tipicamente usada, entretanto, estes TCs ainda apresentam algumas limitações de desempenho.

Em um ambiente de alta tensão, estes sistemas podem facilmente ser danificados pelo calor, por curtos-circuitos ou descargas elétricas atmosféricas, pelo que é necessário utilizar circuitos de proteção e isolamento que exigem manutenção periódica dispendiosa e ainda coloca em perigo o utilizador. Além disso, estes dispositivos não podem ser suspensos sobre a linha elétrica, pois exigem estruturas de suporte, aumentando muito a logística de instalação [2,3].

Portanto, para alcançar redes de energia mais inteligentes e eficientes é fundamental desenvolver tecnologias que satisfaçam essa demanda e proporcionem uma forma eficiente de monitoramento, com vista na obtenção de um melhor funcionamento e desempenho.

Com o desenvolvimento das indústrias de optoeletrônica e comunicação por fibra óptica, emergiram os sensores de fibra óptica, levando a dispositivos de sensores baseados em fibras e componentes para muitos campos de aplicação [4]. Estes tipos de sensores são bastante atraentes e têm vindo a ganhar grande interesse, uma vez que são leves, compactos, mais simples e mais baratos [5-7], estabelecendo uma tecnologia promissora para redes de energia mais sustentáveis, menor custo de manutenção e capacidade de autodiagnóstico. São tipicamente feitos de materiais não-condutores, oferecendo imunidade a interferências eletromagnéticas, apresentando bom desempenho em alta temperatura, alta sensibilidade, robustez ambiental e a capacidade de detecção distribuída.

Outros aspectos importantes são a passividade elétrica, não necessitando de energia elétrica local, resposta linear alta em uma ampla faixa de frequência, possibilidade de medições de corrente alternada - CA e corrente contínua – CC/DC, possibilidade de multiplexação [8] e compatibilidade com a tecnologia de comunicação por fibra óptica. São livres de histerese, possuem ausência de efeitos de saturação e apresentam maior faixa dinâmica e operação de largura de banda maior.

No entanto, apesar de grandes desenvolvimentos, com várias soluções industriais de tecnologia baseada em fibra óptica já sondando o mercado, persistem vários desafios que ainda são temas de pesquisa valiosos, incluindo dependência de temperatura, susceptibilidade a vibrações e confiabilidade a longo prazo [9]. É neste contexto, que tem como motivação este

trabalho, ou seja, buscar/melhorar tecnologias de sensores de fibra óptica que possam monitorar e medir grandezas relacionados aos sistemas de rede de alta tensão (tensão, corrente, etc.).

Este trabalho foi inserido em um projeto internacional de pesquisa e desenvolvimento entre Brasil e Portugal na área de sensores em fibra óptica intitulado **TECCON - Tecnologia de sensores em fibras óptica para supervisão, controle e proteção de sistemas de energia elétrica** e teve como principal motivação o desenvolvimento de novos sistemas baseados em sensores ópticos para monitoramento e otimização de redes elétricas em operação de alta tensão.

Este trabalho foi feito em uma colaboração estabelecida entre a Universidade Federal do Pará - UFPA, Transmissoras Brasileiras de Energia - TBE, o Instituto de Engenharia de Sistemas e Computadores do Porto - INESCTEC e Universidade Federal de Campinas - UNICAMP, tendo suporte financeiro da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES. Além disso, este trabalho foi desenvolvido parcialmente, em forma de estágio de doutoramento, no INESCTEC, em Portugal.

## **1.2. Objetivos**

Este trabalho detém-se na investigação dos sensores ópticos para medição de campo magnético/corrente em ambientes de alta tensão, entre 50 kV e 230 kV. Os objetivos específicos são:

- Desenvolver e caracterizar sensores com prisma de vidro e de fibra microestruturada para diferentes comprimentos de onda compatíveis com as fibras do cabo OPGW - *Optical Ground Wire*, nos quais operam na faixa de 1300 a 1550nm.
- Avaliar a possibilidade de a fonte e o receptor do sensor estarem remotamente interligados por meio dos cabos OPGW.

## **1.3. Metodologia**

Além do estudo teórico aprofundado sobre sensores de fibra óptica para medição de corrente elétrica em linhas de alta tensão, foram realizadas pesquisas através de medidas experimentais de sensores nos laboratórios associados do INESCTEC.

A tecnologia investigada foi dividida em duas etapas: na primeira etapa o sensor de corrente desenvolvido foi baseado em cristais. Esta consiste na concepção, desenvolvimento e caracterização experimental, inclui, também, a confecção de um protótipo.

O laboratório do INESCTEC disponibilizou algumas fontes ópticas o que possibilitou a escolha da fonte SLD (*superluminescent diode*), por ter disponível em vários comprimentos de onda. Apesar desta ter um grau de polarização relativamente elevado, isto pôde ser corrigido usando despolarizadores e assim foi possível comparar resultados com comprimentos de ondas nos valores de 650nm, 830nm e 1550nm. Apesar da fonte de Érbio ser totalmente despolarizada, essa só estava disponível na banda dos 1550nm.

Após uma série de testes, a configuração polarimétrica em quadratura foi escolhida por apresentar maior sensibilidade e eliminar ruídos que ocasionaria perda de sinal. Para dar estabilidade ao sinal, uma fibra monomodo foi acoplada na entrada de uma lente GRIN (*Gradient Index*) e fibras multimodo foram acopladas nas saídas das lentes. Um prisma de vidro de SF-57 foi utilizado como sensor para a confecção do protótipo final.

Na etapa seguinte foi explorado as potencialidades de novas fibras microestruturadas torcidas para implementar sensores ópticos de corrente elétrica de alto desempenho para aplicações de medição (corrente nominal), fabricadas pelo grupo de pesquisa do Laboratório de Fibras Especiais & Materiais Fotônico – LaFE, do Instituto de Física *Gleb Wataghin*, da UNICAMP e caracterizadas nos laboratórios do INESCTEC.

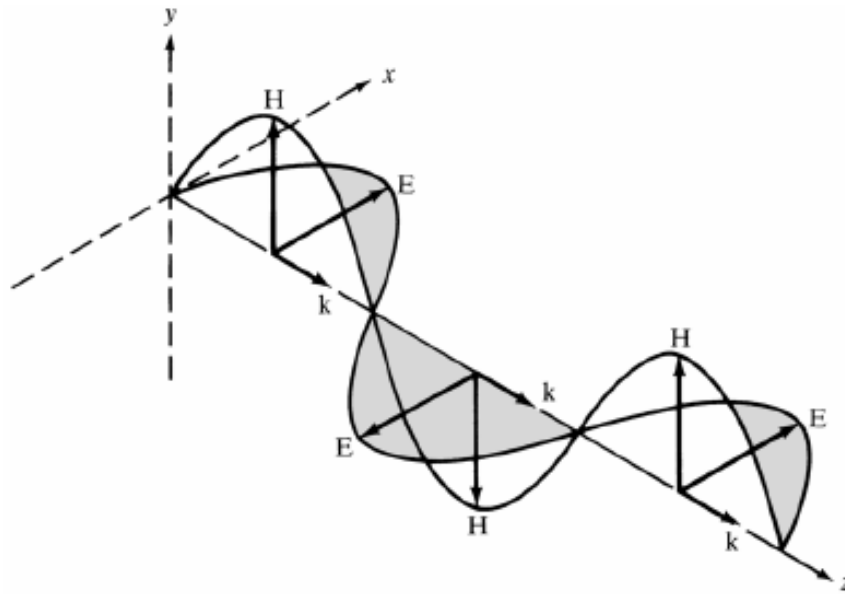
Convém neste momento, apresentar alguns conceitos fundamentais para o entendimento dos princípios que regem o funcionamento dos referidos sensores: polarização, birrefringência, formalismo matricial de Jones, efeito Faraday e métodos de análise de sinal.

#### **1.4. Conceitos fundamentais**

Nesta seção é dada uma breve descrição dos conceitos fundamentais e ferramentas necessárias para entender os sensores ópticos. Os sensores ópticos de corrente elétrica mais populares são, em geral, baseados no efeito Faraday [10], ou seja, no movimento de rotação do vetor de polarização da luz se propagando no interior do material transparente quando está submetido a um campo magnético.

### 1.4.1. Polarização

A luz é uma onda eletromagnética transversal, ou seja, os campos elétrico e magnético são perpendiculares à direção de propagação do vetor  $k$ , conforme indicado na Figura 1.1 [11]. Ao considerar uma onda plana, isto é, levando em conta a direção de propagação na direção positiva do eixo  $z$ , os campos elétrico e magnético irão oscilar somente no eixo  $x$  e  $y$ , respectivamente.



**Figura 1.1** – Onda plana se propagando no eixo  $z$ , tendo polarização na direção  $x$ .

Imagine que um observador, na direção positiva do eixo  $z$ , esteja observando o comportamento do vetor campo elétrico. Ele verá o vetor oscilar em amplitude e direção ao longo do eixo  $x$ . Assim, o desenho traçado pelo vetor campo elétrico em um plano transversal a direção de propagação (nesse caso  $z$ ) é chamado de *polarização da onda eletromagnética*. Cabe ressaltar, que no caso em que foi analisado, indicado pela Figura 1.1, a polarização é dita na direção do eixo  $x$ . Também, é importante observar que a direção de polarização é aquela dada pelo campo elétrico.

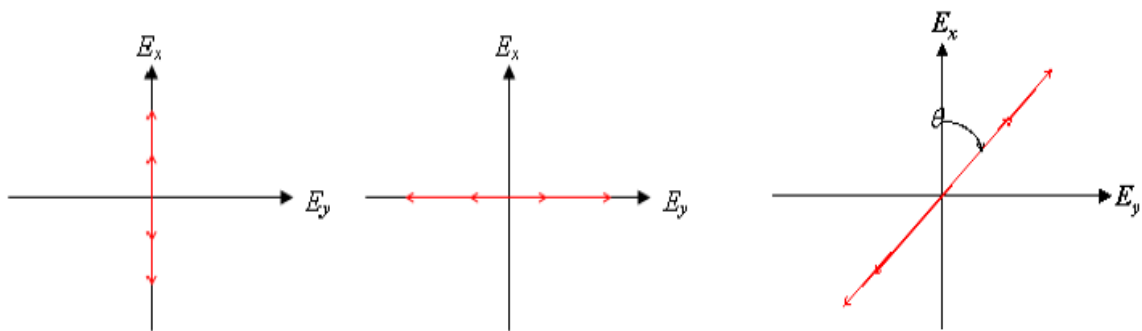
Considere uma onda eletromagnética plana que se propaga na direção positiva do eixo  $z$ , dada por:

$$\vec{E} = E_x \hat{a}_x + E_y \hat{a}_y = E_{x0} \cos(\omega t - kz + \phi_x) \hat{a}_x + E_{y0} \cos(\omega t - kz + \phi_y) \hat{a}_y \quad (1.1)$$

nos quais  $\hat{a}_x$  e  $\hat{a}_y$  são os vetores unitários correspondentes aos eixos x e y,  $\phi_x$  e  $\phi_y$  são os termos de fase das componentes x e y, respectivamente,  $\omega$  é a frequência angular da onda e  $E_{x0}$  e  $E_{y0}$  são as amplitudes das componentes nas direções x e y, respectivamente.

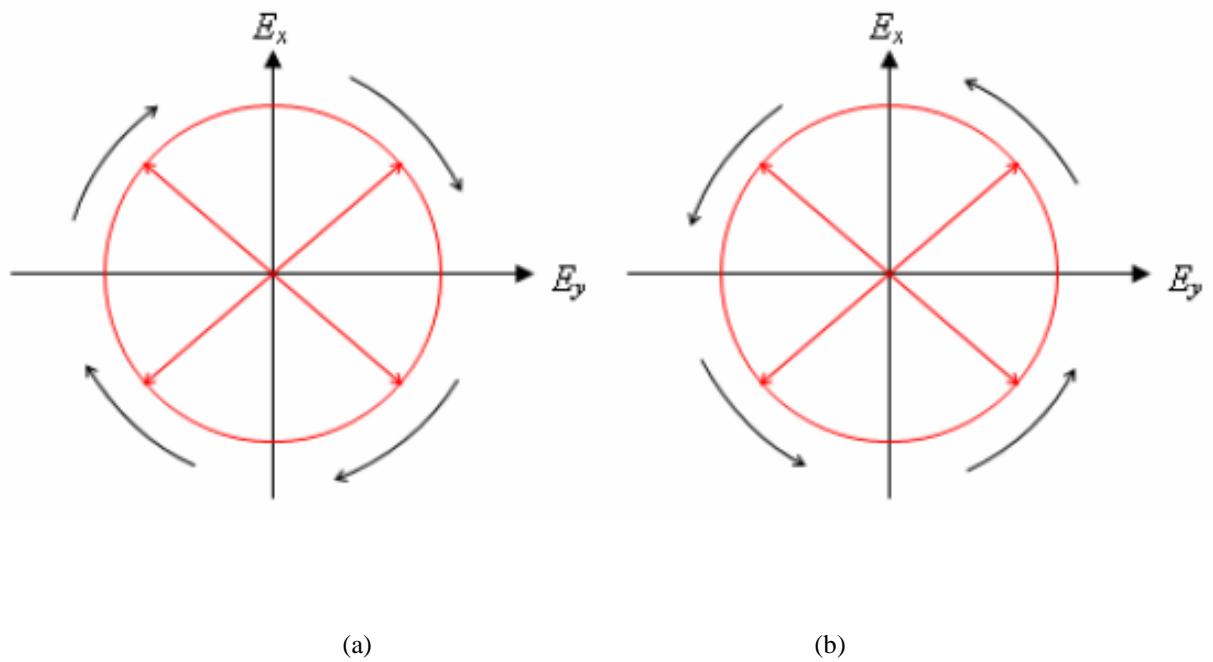
A polarização das ondas eletromagnéticas pode ser classificada, de acordo com os valores das amplitudes e fases relativas, em linear, circular e elíptica.

**a) A polarização linear** ocorre quando uma das componentes  $E_x$  ou  $E_y$  for nula (polarização vertical ou horizontal), ou quando a fase relativa for igual a zero. Uma representação gráfica de polarização linear pode ser vista na Figura 1.2.



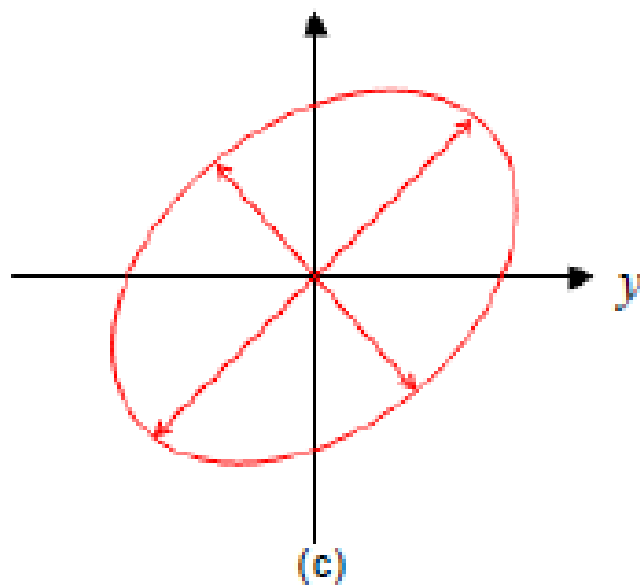
**Figura 1.2** - Representação de diferentes tipos de polarização linear

**b) Polarização circular** ocorre quando as componentes  $E_x$  ou  $E_y$  forem iguais e a diferença de fase de  $+\pi/2$ , veja representação na Figura 1.3, (polarização circular direita (a)) ou  $-\pi/2$  (polarização circular esquerda (b)).



**Figura 1.3** - Representação das polarizações circular direita (a) e esquerda (b).

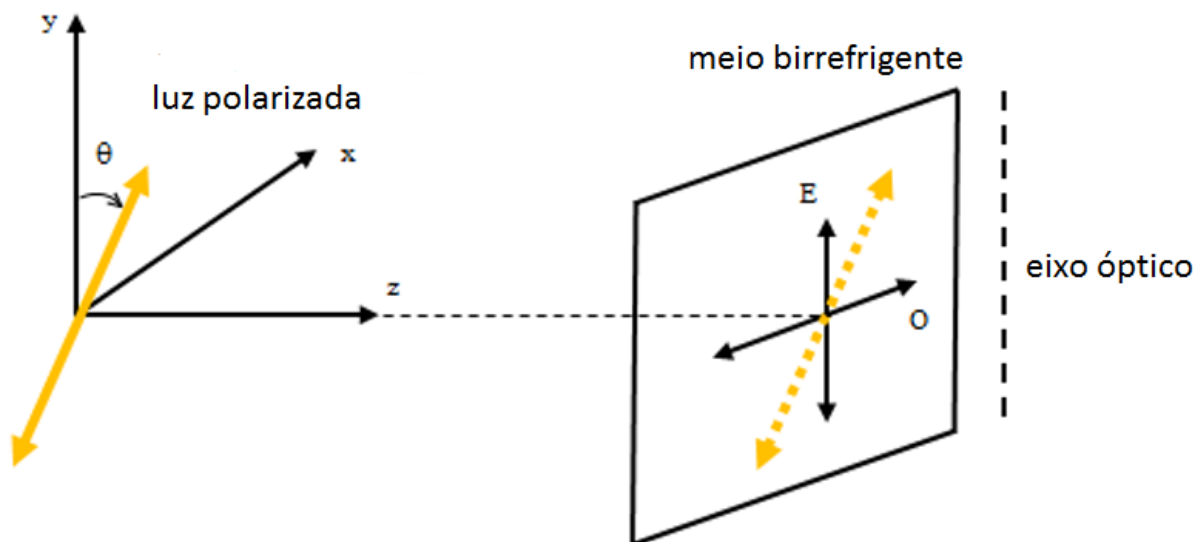
**c) Polarização elíptica** são todos os outros casos com diferenças relativas de amplitudes entre  $E_x$  ou  $E_y$  e de fase não abrangidos pelas polarizações lineares ou circulares. Sua representação está na Figura 1.4.



**Figura 1.4** - Representação da polarização elíptica

### 1.4.2. Birrefringência

Quando a luz se propaga num meio opticamente isotrópico, as propriedades ópticas são as mesmas em todas as direções, isto é, existe um único índice de refração [12]. No entanto, quando a luz incide num meio anisotrópico, independente do estado de polarização inicial, a direção de oscilação do seu campo elétrico pode ser decomposta em duas componentes conhecidas como raio extraordinário (paralela à direção do eixo óptico do meio) e raio ordinário (perpendicular ao eixo óptico do meio), que se propagam com diferentes velocidades. Isto significa que existem dois índices de refração distintos:  $n_e$  e  $n_o$  relacionados com os eixos extraordinário e ordinário, respectivamente (Figura 1.5). Portanto, meios com essa característica são chamados de meios birrefringentes.



**Figura 1.5** – Diagrama ilustrando uma onda plana linearmente polarizada formando um ângulo  $\theta$  em relação ao eixo óptico do meio (na direção  $y$ ). A onda incide em um meio birrefringente onde as componentes extraordinárias (E) e ordinária (O) são indicadas.

Dependendo do material utilizado, o mesmo pode apresentar birrefringência circular ou linear. A birrefringência circular ocorre quando um material é capaz de rotacionar o ângulo de polarização de um feixe linearmente polarizado. Enquanto que a birrefringência linear ocorre quando as polarizações 'selecionadas' pelo material, se propagam com velocidades distintas, de modo linear e ortogonal.



### 1.4.3. Formalismo matricial de Jones

Quando a luz interage com os componentes ópticos (polarizador, placa de onda, lentes, fibra, etc.) tem seu estado de polarização modificado. Desta forma é necessário representar em um sistema de coordenadas o novo estado de polarização. Considerando que o campo elétrico após a interação é polarizado e, também, devido à natureza vetorial do campo, se sugere uma representação vetorial dos estados de polarização. Isso é possível utilizando os vetores de Jones (formalismo matricial) [12-13]. Assim, os estados de polarização são obtidos em função das amplitudes das componentes  $E_x$  e  $E_y$  do campo elétrico e não pela intensidade da luz. Considere um vetor campo elétrico  $\vec{E}_{out}$  que corresponde a luz após a interação com o sistema, podemos expressá-lo como uma função do vetor campo elétrico incidente,  $\vec{E}_{in}$ , usando a equação:

$$\vec{E}_{out} = J_{sistema} \vec{E}_{in} \quad (1.2)$$

onde  $J_{sistema}$  representa a matriz de Jones associada ao sistema óptico. Assim, a polarização do campo elétrico após uma sequência de  $n$  componentes ópticos, pode ser facilmente determinada se as respectivas matrizes de Jones são conhecidas. Deste modo, podemos considerar a matriz de Jones do sistema como o produto das matrizes de Jones de cada elemento, como na seguinte expressão:

$$J_{sistema} = J_1 J_2 \dots J_n \quad (1.3)$$

### 1.4.4. Efeito Faraday

O efeito Faraday, também conhecido como efeito magneto-óptico foi observado em 1845 por Michael Faraday [14]. Este efeito se caracteriza pela mudança da direção de polarização de um feixe de luz linearmente polarizado quando este se propaga ao longo de um meio transparente na presença de um campo magnético.

Para um estado de polarização genérico, o vetor campo elétrico pode ser decomposto em uma combinação de dois modos de polarização circulares ortogonais (esquerda e direita). Nestas condições, a aplicação de um campo magnético traduz-se no acúmulo de uma fase relativa entre dois modos de polarização, que é proporcional ao campo magnético. Para a luz linearmente polarizada, esta fase resulta em uma rotação do plano de polarização da luz do

campo elétrico. Em particular, o ângulo de rotação de Faraday ( $\theta_f$ ) resultante da propagação sob a influência de um campo magnético ( $B$ ) ao longo de um caminho  $L$ , é dado por [14-17]:

$$\theta_f = \int_L^0 V B \cdot dL \quad (1.4)$$

onde  $V$  é a constante de Verdet para o material, usualmente expresso em rad/m.T ou min. de arco/Gauss.cm. Esta constante dependerá do comprimento de onda da luz e sua demonstração será detalhada no Apêndice A, o que nos leva a [18]:

$$V = \frac{e\lambda}{2mc} \frac{dn}{d\lambda} \approx \frac{\pi \gamma}{\lambda n} \quad (1.5)$$

em que  $\lambda$  é o comprimento de onda da radiação e  $n$  o índice de refração do material,  $e$  é a carga elementar,  $m$  é a massa do elétron,  $c$  é a velocidade da luz e  $\gamma$  é um fator de correção conhecido como coeficiente de magneto-giração [19-20]. O grau desta dependência mantém estrita relação com o tipo de material em questão, e pode limitar consideravelmente o desempenho de um sensor.

Dessa forma, torna-se fundamental a relação entre a sensibilidade, o comprimento de onda e a estabilidade com a temperatura. Logo, devem ser considerados no dimensionamento de qualquer sistema baseado neste fenômeno.

O efeito Faraday é observado em materiais diamagnéticos, paramagnéticos e ferromagnéticos. No caso de materiais diamagnéticos, a constante de Verdet é relativamente baixa e sua dependência com a temperatura também é reduzida. Para materiais paramagnéticos e ferromagnéticos, os valores das constantes de Verdet são altos, mas também mudam significativamente com a temperatura. Além disso, estes materiais exibem efeitos de saturação. Os valores das constantes de Verdet mais elevados são encontrados em materiais ferromagnéticos, no entanto, mudanças com temperatura e comprimento de onda também são muito altas e apresentam fenômenos de saturação indesejáveis. Além disso, alguns materiais paramagnéticos não apresentam uma resposta linear com o campo magnético e podem apresentar alguma histerese.

Na Tabela 1.1 [20-23] podem ser observados os valores de  $V$  para alguns materiais que desempenham a função de sensores ópticos de corrente elétrica que empregam o efeito de Faraday.

**Tabela 1.1** – Valores da constante de Verdet, operando com 633 nm.

$\lambda = 633\text{nm}$	Material	Constante de Verdet (rad/T.m)
<b>Diamagnético</b>	SiO <sub>2</sub> (Silica)	3,67
	BK-7	4,9
	SF-57	21,8
<b>Paramagnético</b>	ZnSe	31,94
<b>Ferromagnético</b>	Ga:YIG	3141,59

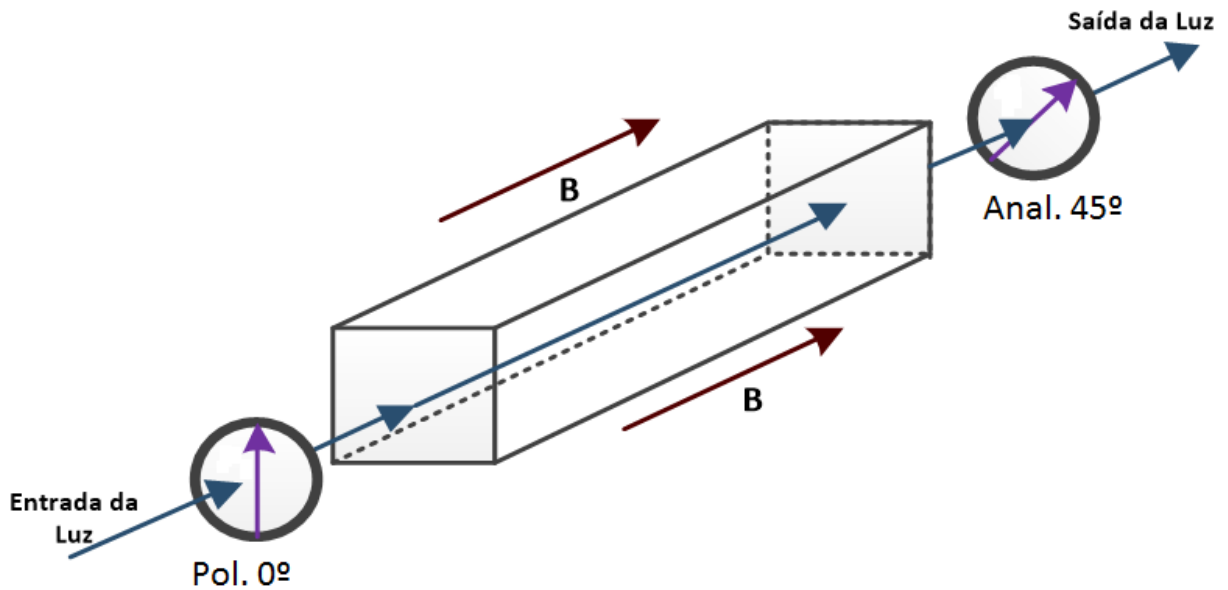
Da Tabela 1.1 é possível observar que a constante de Verdet é pequena para muitos materiais diamagnéticos, entre eles a sílica (SiO<sub>2</sub>). Isso é particularmente ruim visto que a sílica é o principal material do qual se fabricam fibras ópticas. A justificativa para a fabricação de um sensor em sílica se dá, então, pelas bem estabelecidas técnicas de fabricação de fibras ópticas nesse material. E como forma de contornar a baixa sensibilidade é possível aumentar o comprimento de interação entre o campo magnético e a luz, fabricando comprimentos maiores de fibras ópticas.

#### **1.4.5. Métodos de análise de sinal**

Embora existam materiais com elevada constante de Verdet, o efeito que a polarização sofre devido ao campo magnético é, geralmente, muito pequeno, sendo da ordem de décimos de grau por kA. Desta forma, faz-se necessário a utilização de métodos que permitam analisar com precisão pequenas alterações nas propriedades da radiação. Tais métodos, abordados a seguir, permitem traduzir uma variação do estado de polarização em uma potência óptica [17].

##### **a) Detecção polarimétrica simples**

A forma mais utilizada para transformar a rotação de Faraday numa modulação de potência óptica facilmente medida com um fotodetector, é através do método de detecção polarimétrica. Na configuração mais simples é colocado um polarizador (Pol. 0°), na entrada do sensor, com o objetivo de definir o estado de polarização inicial da luz e um segundo polarizador ou analisador (Anal. 45°) é colocado na saída do sinal óptico após a passagem pelo sensor, controlando sua sensibilidade e transformando a rotação de polarização numa modulação de intensidade de luz que pode ser medida utilizando um fotodetector. O esquema básico é apresentado na Figura 1.6.

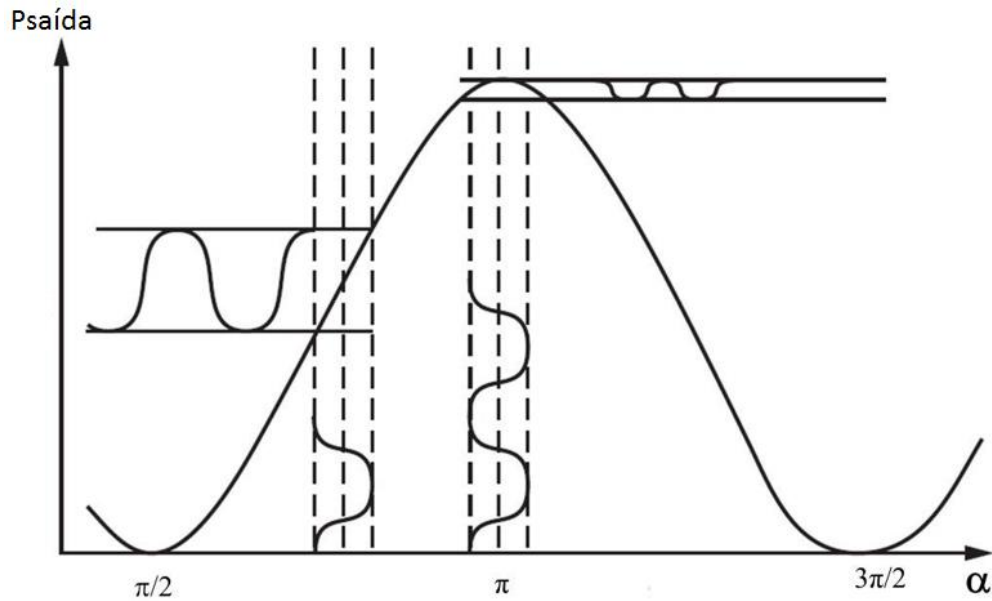


**Figura 1.6** - Esquema básico da medição da rotação do estado de polarização

Ao rodar o analisador se determina a distribuição de energia pelas diferentes componentes do feixe linearmente polarizado. Desta forma, um fotodetector colocado à saída do analisador permite avaliar a rotação do plano de polarização. Segundo a lei de Malus, quando dois polarizadores estão em tal arranjo, a intensidade da luz de saída ( $P_{saída}$ ) é dada por:

$$P_{saída} = P_0 \cos^2(\alpha) \quad (1.6)$$

onde  $P_0$  é a intensidade ou potência da luz após o primeiro polarizador e  $\alpha$  é o ângulo relativo entre o eixo de transmissão dos dois polarizadores. Na Figura 1.7 verifica-se uma maior incidência de feixes de luz atravessando os polarizadores na faixa angular de  $45^\circ$  ( $\pi/4$ ).



**Figura 1.7** – Função de transferência de dois polarizadores consecutivos mostrando a potência transmitida como função do seu ângulo relativo.

Ajustando os polarizadores para a máxima incidência, a função de transferência do sensor é dada por [5,12]:

$$P_{saída} = \frac{P_0}{2} [1 + \text{sen}(2\theta_f)] \quad (1.7)$$

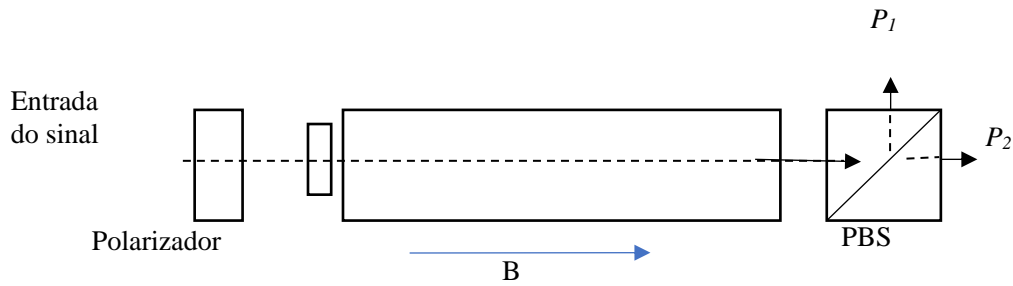
lembrando que  $\theta_f$  é o ângulo de rotação de Faraday.

Em sistemas de detecção polarimétricas, um simples circuito eletrônico analógico detecta a amplitude do sinal de saída ( $S$ ). Este é obtido dividindo a componente AC pela componente DC para obter um sinal que é independente de flutuações na potência óptica. A partir de (1.7) verifica-se que este sinal é dado por [5]:

$$S = \text{sen}(2\theta_f) \quad (1.8)$$

### **b) Detecção polarimétrica em dupla quadratura**

Outra melhoria do esquema apresentado anteriormente é mostrada na Figura 1.8, na qual a intensidade dos feixes de luz na saída é dividida em duas polarizações ortogonais, através do prisma Wollaston ou por um divisor de feixe dependente da polarização (PBS - *Polarizing Beam Splitter*).



**Figura 1.8** – Esquema de detecção polarimétrica em dupla quadratura

As intensidades dos dois feixes são detectadas separadamente e os dois sinais ópticos enviados para um circuito eletrônico analógico que calcula a função na saída dada por [5]:

$$S = \frac{P_1 - P_2}{P_1 + P_2} = \text{sen}(2\theta_f) \quad (1.9)$$

Desta forma, considerando que a modulação de Faraday em cada uma das saídas está em oposição de fase, torna-se possível eliminar efeitos de ruído comuns como flutuações induzidas por vibrações. Tipicamente, nos materiais de vidro a birrefringência linear ( $\beta$ ) é desprezível. Além disso, se o coeficiente elasto-óptico é também extremamente baixo, como é para o material SF57, é praticamente imune à birrefringência induzida devido à pressão [5].

Para um sensor de corrente óptico que utiliza uma fibra óptica como o elemento sensor, esta condição não é normalmente cumprida devido à presença da birrefringência intrínseca induzida por elipticidade do núcleo ou a birrefringência extrínseca causada em implantar o elemento sensor de fibra. Deste modo, quando a rotação de Faraday é relativamente pequena e uma birrefringência linear ( $\beta$ ) presente no interior da fibra sensora é incluída no elemento de detecção, o sinal na saída  $S$ , torna-se [5]:

$$S = 2\theta_f \frac{\text{sen}\beta}{\beta}, \text{ se } \beta \gg 2\theta_f \quad (1.10)$$

O fenômeno da birrefringência linear induzida [24], traduz-se em diferentes velocidades de propagação para dois modos de polarização linear ortogonais, onde a radiação linearmente polarizada propagando-se num meio com este atributo vai transformar-se, devido a defasagem introduzida entre as duas componentes, em radiações elipticamente polarizadas, acarretando em uma diminuição de sensibilidade, conforme visto na Equação 1.10.

## **1.5. Organização da Tese**

Neste capítulo inicial foi descrito os princípios de funcionamento dos sensores ópticos, passando pela polarização, birrefringência, formalismo de matrizes de Jones e métodos de detecção. No capítulo 2 foi feita uma breve introdução acerca das tecnologias de monitoramento de sistemas de transmissão e distribuição de energia, bem como as tecnologias disponíveis para esse monitoramento, nomeadamente os transformadores de medida de corrente convencional e os sensores ópticos. No capítulo 3 e 4 é descrita a caracterização e montagem do protótipo do prisma sensor, respectivamente. No capítulo 5 é caracterizado um sensor baseado em fibras. As principais conclusões, comentários e contribuições relativas ao tema abordado e sugestões de trabalhos futuros são apresentados no capítulo 6. Neste capítulo busca-se propor algumas sugestões para o melhor funcionamento dos sensores apresentados nesta tese, de modo a se garantir uma maior confiabilidade no monitoramento dos parâmetros de rede elétrica.

# Estado da Arte

Para uma melhor compreensão do contexto exposto, se faz necessário um breve levantamento histórico sobre a evolução dos instrumentos para medição de corrente (transformadores de corrente convencional e sensores ópticos) ao longo do tempo, esclarecendo quais fatores nortearam tal evolução.

## 2.1. Transformadores de medida de corrente convencional

Os primeiros passos para o desenvolvimento/criação dos transformadores foram dados no início do século XIX. Físicos como Hans Christian Oersted, Joseph Henry, André-Marie Ampère, Faraday, Simon Ohm, Thomas Alva Edison e Tesla contribuíram significativamente no desenvolvimento da eletricidade e do magnetismo. Mas foi após a Guerra das Correntes [25] que foi inventado o primeiro dispositivo de distribuição de energia elétrica, o transformador, como mostrado na Figura 2.1, desenvolvido pelo físico Willian Stanley, permitindo a distribuição de eletricidade para uso doméstico [26].

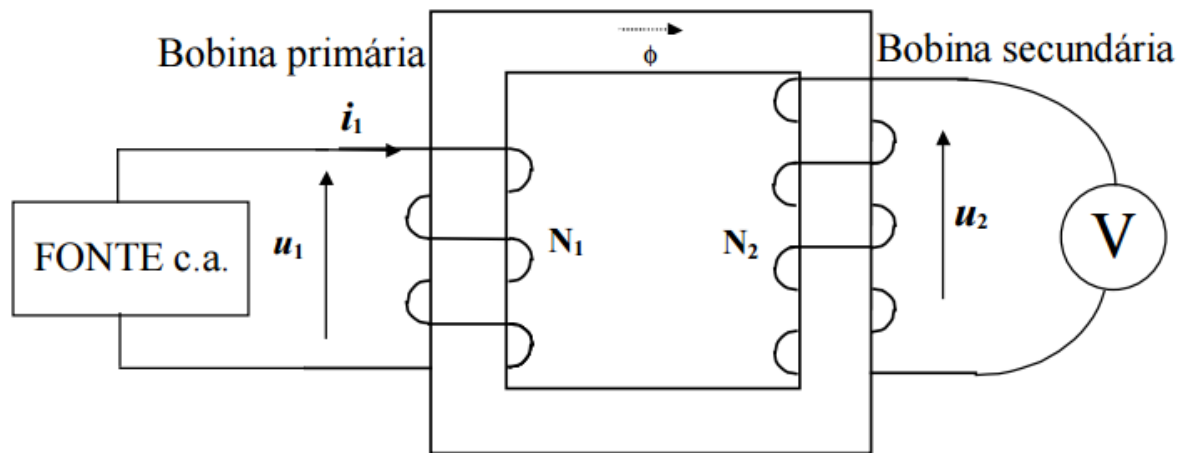


**Figura 2.1** - O Transformador de Stanley.



Transformadores ou trafos são dispositivos elétricos que têm a finalidade de isolar um circuito, elevar ou diminuir uma tensão. Em outras palavras, são dispositivos utilizados de modo a tornar compatível as faixas (escalas) de atuação dos instrumentos de medição, controle e fornecer a devida proteção dos mesmos. Eles servem também como elementos de isolamento entre os circuitos ligados no secundário e o circuito de alta tensão. Servem também para casar impedância entre diferentes circuitos [27].

Na Figura 2.2, é possível ver um transformador básico constituído de dois enrolamentos (bobinas), primário e secundário, onde o fluxo magnético variável produzido em um, age sobre o outro. O enrolamento no qual a fonte é aplicada é o primário, enquanto que o enrolamento onde a carga é conectada é o secundário.



**Figura 2.2** - Transformador de núcleo de ferro, caso ideal.

Do ponto de vista teórico, em um transformador sem perdas, a potência elétrica obtida no secundário é igual à potência elétrica injetada no lado primário. O transformador representado na Figura 2.2, possui  $N_1$  espiras no primário e  $N_2$  espiras no secundário. A relação de transformação ( $\alpha$ ) para este transformador é [28]:

$$\alpha = \frac{i_2}{i_1} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{u_1}{u_2} \quad (2.1)$$

sendo,  $u_1$  e  $i_1$  a tensão e corrente no primário, respectivamente e  $u_2$  e  $i_2$ , a tensão e corrente no secundário, respectivamente. Se uma carga  $Z$  for ligada aos terminais do secundário do transformador, a impedância de carga é definida como:

$$Z_2 = \frac{u_2}{i_2} \quad (2.2)$$

Similarmente, a impedância equivalente de entrada, olhando-se os terminais a partir da fonte, é:

$$Z_1 = \frac{u_1}{i_1} \quad (2.3)$$

Agrupando as Equações 2.1, 2.2 e 2.3:

$$Z_1 = \alpha^2 Z_2 \quad \text{ou} \quad \frac{Z_1}{Z_2} = \alpha^2 = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 \quad (2.4)$$

A Equação 2.4 estabelece que a relação da impedância de entrada para a de saída é (igual a) o quadrado da relação de transformação. Esta relação implica em que os transformadores podem servir como dispositivos para o acoplamento de impedância, de modo a prover a máxima transferência de potência de um circuito a outro.

Basicamente existem dois tipos de transformadores para instrumentos (TI). Os transformadores de corrente (TC) destinados a operar com seus secundários sobre cargas com impedância reduzida e saída de corrente padronizada em 5A e os transformadores de potencial (TP) desenvolvidos para operar com os terminais do secundário com cargas de elevadas impedâncias e saída de tensão padronizada em 115V [29]. Uma vez que nosso interesse está direcionado para medição/controlado de corrente, será feita uma breve revisão apenas sobre os TC.

### **2.1.1. Transformadores de correntes**

Os transformadores de corrente convencionais (TC) são formados a partir de um núcleo de ferro e por enrolamentos primários e secundários isolados eletricamente para funcionar/operar em um dado nível de tensão.

Todos os equipamentos utilizados em sistemas de energia elétrica devem seguir normas e padrões. A Eletrobrás Eletronorte – Centrais Elétricas do Norte do Brasil S/A por exemplo, nos últimos anos, tem adquirido transformadores de corrente com especificações conforme mostrado na Tabela 2.1.

**Tabela 2.1** – Transformadores de medidas de corrente adquiridos pela Eletrobrás Eletronorte

TC	2014	2015
PREÇO	R\$61.500,00	R\$53.800,00
Tensão Máxima	245 kV	245 kV
NBI	950 kV	950 kV
Corrente suportável nominal de curta duração (IT)	40,0 kA	40,0 kA
Valor de crista nominal de corrente suportável (ID)	104 kA	104 kA
01 Núcleo de medição		
Relação	400/600/1000X800/1200/2000-1A	400/600/1000X800/1200/2000-5A
Classe de exatidão	0,3C2,5	0,6C50
Fator térmico	1,2	1
03 Núcleos de proteção		
Relação	400/600/1000X800/1200/2000-1-1-1A	400/600/1000 X 800/1200/2000-5-5-5A
Classe de exatidão	3XTPY	3XTPY
Fator térmico	1,2	1

O NBI (Nível Básico de Impulso) indica o limite do nível de sobretensão do TC. O fator de crista é a razão entre a corrente de pico e a corrente RMS, acima deste valor a medição do TC distorce.

No caso da classe de exatidão, sua função é mostrar nominalmente o erro máximo esperado do transformador de corrente levando em conta o erro de relação de transformação e o erro de defasagem angular entre as correntes primária e secundária [32]. Esses erros são dados pela Equação:

$$Erro = \frac{(KU_S - I_P)}{I_P} 100\% \quad (2.5)$$

onde  $K$  é a razão de transformação,  $U_S$  é a corrente que passa no secundário do transformador e  $I_P$  é a corrente que passa através do primário. No entanto, quando se trata de sensores ópticos de corrente, uma vez que não existe um transformador convencional, o parâmetro  $KU_S$  refere-se à precisão do sensor óptico (que será visto na próxima seção), após a calibração.

Para definir a classe de exatidão empregada nos TCs, deve-se considerar a aplicação dos mesmos (medição, controle e proteção). Segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT [32], no caso da medição, os TCs possuem as seguintes classes de exatidão: 0,1%, 0,2%, 0,3%, 0,5%, 0,6%, 1,0% e 1,2%.

A classe 0,3% é obrigatória em medição de energia para faturamento. As outras são usadas nas medições de corrente, potência, ângulo, etc. Em geral, a indicação da classe de exatidão precede o valor correspondente à carga nominal padronizada, por exemplo: 0,3-C2,5. Isto é, índice de classe = 0,3%, para uma carga padronizada de 2,5 VA (volt-ampere). Os TCs apresentados na Tabela 2.1 possuem 4 núcleos: 1 de faturamento / medição e 3 para proteção.

Desta forma, é importante considerar esses requisitos de modo a atender os aspectos não só técnicos, mas também de custo, de transição com as tecnologias vigentes, das aplicações iniciais e potenciais, cronograma de instalação e critérios de homologação, entre outras.

Os transformadores não são, na grande maioria das situações práticas, calibrados em campo (devido às dificuldades inerentes do processo), podendo após algum tempo sofrer desvios da sua exatidão. Além disso, tanto a remoção para calibração em laboratório quanto a instalação de um padrão para calibração no campo podem acarretar longos períodos de interrupção do fornecimento de energia, o que em muitas situações faz com que seja inviável fazer verificações.

Além dos problemas citados nos parágrafos anteriores, com a introdução de sistemas de proteção digitais ou micro processados surgiu a necessidade de eliminar grande parte da interferência eletromagnética nos sistemas de medição de tensão [5].

Em resumo, estes transformadores precisam ser melhorados em termos de exatidão, segurança, interferência eletromagnética, estabilidade e resposta em frequência, a fim de estar à altura dos novos sistemas de medição e proteção. Diante dessas circunstâncias, torna-se essencial o desenvolvimento de tecnologias que se adaptem a essas novas exigências. Para preencher essa demanda foram desenvolvidos, os chamados sensores ópticos [15]. Tais sensores serão descritos a seguir.

## **2.2. Sensores ópticos de corrente elétrica**

Sensores ópticos são dispositivos promissores para uma variedade de aplicações devido a sua precisão, longo tempo de estabilidade e fácil implementação. Dependendo da configuração utilizada, esses sensores podem ser empregados para medir deslocamentos, deformação mecânica, posição, pressão, aceleração, ângulo, rotação, nível de líquido, radiação ionizante, campo elétrico, campo magnético, campo acústico, corrente elétrica, tensão elétrica, temperatura, etc [16].

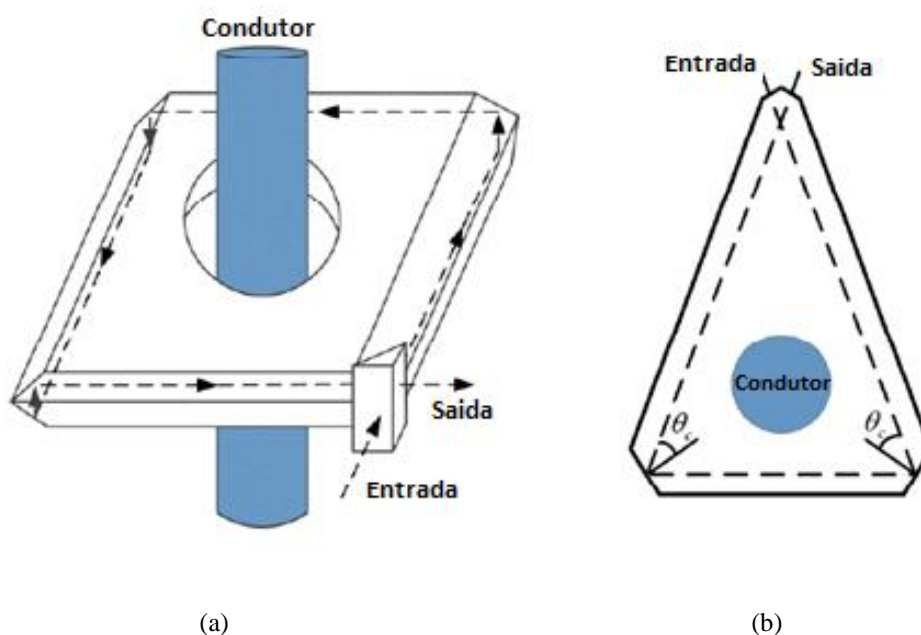
Os sensores ópticos se beneficiam de baixa susceptibilidade a interferência eletromagnética, inércia térmica, não produzem centelhamento, possuem altas sensibilidade e faixa dinâmica, suportam altas temperaturas, não sofrem oxidação ou corrosão, etc. São estas características que os tornam adequados para aplicações industriais e em linhas de transmissão de energia elétrica [13].

No caso da aplicação para o monitoramento de linhas de transmissão de energia elétrica (foco desta tese), um sensor óptico de corrente é normalmente composto por um elemento óptico sensível que mede a integral do campo magnético ao longo da região de detecção e uma fibra óptica de ligação que liga o elemento sensor à unidade de controle e processamento optoeletrônico [18].

Hoje em dia há uma grande diversidade de sensores ópticos de corrente englobando quatro grupos [33-34].

### 2.2.1. Prisma sensor de SF57

Estes sensores utilizam um prisma de vidro ou de cristal, com alta constante de Verdet como o transdutor, o qual está colocado perto (ou em torno) do condutor elétrico [35], conforme mostrado na Figura 2.4 (a). Neste caso, também, o campo magnético é medido usando o efeito magneto-óptico.



**Figura 2.3** - (a) Prisma sensor com dupla reflexão. (b) Prisma sensor com formato triangular [35].

Os prismas sensores possuem algumas vantagens em relação aos sensores à fibra, por exemplo, são dispositivos bem menores e mais rígidos mecanicamente, ou seja, gradientes mecânicos, variações térmicas, outros ruídos externos e vibrações pouco alteram a performance destes tipos de sensores. Pois, existe alguma susceptibilidade na ligação da fibra à parte de cristal relativamente à vibração, que pode causar perturbações na potência óptica acoplada. Essa é uma das razões porque se usa o processamento soma/quadratura, para eliminar estas dependências.

Além disso, possuem constante de Verdet tipicamente duas vezes maior que as encontradas em fibras ópticas (tipicamente para o SF57 a 650nm, é 21 rad/(m·T), por exemplo), e devido ao seu baixo coeficiente fotoelástico, a birrefringência linear é muito pequena o que permite obter um sensor com alta sensibilidade, sendo tipicamente da ordem de  $2,35 \times 10^{-5}$  rad/A, para o caso de uma configuração triangular (Figura 2.4 (b)) [36]. Também, outra grande vantagem, é que o sensor em torno do condutor não tem que ser uma peça única de material (ver Figura 2.4 (a) e (b)), o que permite uma instalação fácil, sem a necessidade de interromper a corrente no condutor.

Por outro lado, esse tipo de sensor possui algumas limitações ou desvantagens, como por exemplo, reflexões internas são necessárias para que o feixe de luz percorra um caminho fechado [37]. De acordo com a Equação de Fresnel [38], quando a luz linearmente polarizada é refletida em um ângulo de incidência maior do que o ângulo crítico, há uma diferença de fase entre as duas componentes ortogonais da luz após a reflexão e o estado de polarização da luz é alterado. Esta mudança no estado de polarização da luz altera a sensibilidade do sensor de forma similar à birrefringência em um sensor de corrente de fibra óptica. Assim, a redução dessa diferença de fase induzida por reflexão é uma das principais questões abordadas em projetos de sensor com cristais.

Embora esse problema possa ser resolvido por meio de um isolamento, tal solução implicará em um elevado custo de funcionamento, manutenção e instalação do sensor [39]. Além disso, a reflexão interna introduz uma diferença de fase entre as duas polarizações. Assim, em um esquema polarimétrico ou interferométrico, isso gera uma fonte de erro inevitável [40]. Outra solução é a utilização de reflexões duplas em cada canto do prisma óptico, onde a diferença de fase óptica introduzida na primeira reflexão é compensada pela segunda reflexão, como mostrado na Figura 2.4 (a) [41]. Nela mostra-se o elemento sensor em forma de quadrado, no qual é formado um caminho óptico fechado através da reflexão nos três cantos, em que um

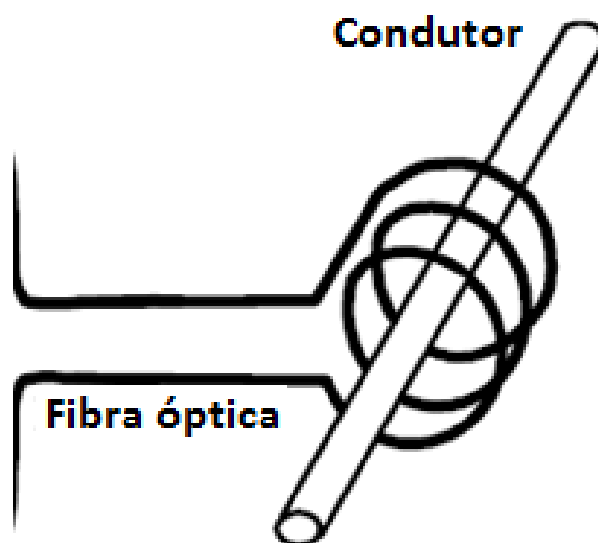
feixe de luz polarizado linearmente é totalmente refletido duas vezes. Sob certas condições, a diferença de fase induzida pela reflexão pode anular-se mutuamente através das reflexões duplas.

Outro fator importante, é a compensação da birrefringência linear o que implica em um aumento da sensibilidade do sensor. Na literatura, encontra-se que com a utilização de um espelho de Faraday pode-se reduzir o ângulo de rotação do plano de polarização devido a birrefringência linear de  $20^\circ$  para  $5^\circ$  [24]. A dependência da constante de Verdet com o comprimento de onda é outro fator importante, uma vez que altera a sensibilidade do sensor [42]. Também, foi demonstrado que os erros introduzidos por uma fonte óptica com uma pequena largura de banda são muito pequenos e, conseqüentemente, é razoável usar os modelos que assumem que a fonte de luz é monocromática [43].

Deve-se enfatizar que em casos mais específicos, como por exemplo, em aplicações em que o objetivo é detectar somente um aumento na intensidade e não seu valor, ou quando se quer medir efetivamente o campo magnético independente de sua origem, existem configurações mais simples. Em tais configurações, o prisma é colocado próximo da fonte, juntamente com o polarizador e analisador, conforme é indicado a Figura 1.6 no Capítulo 1, onde na ausência de campos externos uma calibração adequada permite inferir efetivamente a corrente através do campo magnético na proximidade de um condutor [44]. Esses sensores mais simples foram testados primeiro, depois é que começaram a aparecer os de percurso fechado. Também deve-se mencionar que o sensor simples foi implementado nesta Tese.

### **2.2.2. Sensores em fibra**

Nos sensores de fibra óptica a própria fibra atua como um transdutor, onde o efeito magneto-óptico é utilizado para induzir uma rotação no ângulo de polarização da luz que se propaga na fibra, a qual é proporcional ao campo magnético. Para que a modulação óptica seja univocamente proporcional a uma corrente, o percurso óptico da radiação deve, de acordo com a lei de Ampère, ser fechado em torno do condutor pelo qual circula essa corrente, conforme observado na Figura 2.5.



**Figura 2.4** – Sensor de fibra óptica em volta de um condutor

Assim, nesses sensores é extremamente prático implementar uma configuração na qual é medido a integral do campo magnético em torno do condutor, simplesmente, enrolando a fibra em torno do mesmo [45]. Conseqüentemente, tal dispositivo permite obter imunidade a campos magnéticos gerados por fontes externas. Entretanto, como esses sensores são construídos a partir de vários metros de fibra, são mais suscetíveis a gradientes de pressão e temperatura, vibrações mecânicas e outros ruídos ambientais em comparação com os sensores em cristais.

Geralmente, a fibra de sílica possui constante de Verdet menor que a de um sensor em cristais. Com o objetivo de aumentar a constante de Verdet, muitos materiais têm sido estudados com esta finalidade. Conforme visto na Tabela 1.1, materiais tais como vidro apresentaram uma constante de Verdet aproximadamente seis vezes maior do que a da sílica fundida, para o mesmo comprimento de onda, e um coeficiente fotoelástico muito menor (780 vezes) ( $p_{SiO_2}=0,286$ ) [46-47]. Para um aprofundamento detalhado sugerimos a referência [48], nela é possível encontrar informações detalhadas dos sensores a base de vidro de chumbo.

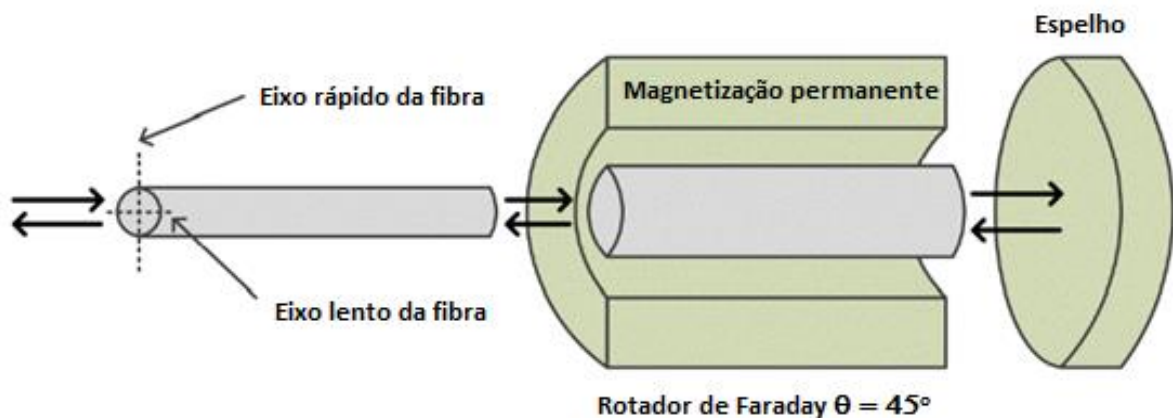
Resultados obtidos, usando um novo vidro óptico, demonstraram que as fibras construídas a partir de tal material exibiam uma constante de Verdet 10 vezes maior e com uma tensão mecânica interna pequena em comparação com as fibras padrões [49]. Também, recentemente, foi desenvolvida uma fibra óptica dopada com térbio-fosfato no núcleo com uma constante de Verdet seis vezes maior do que as fibras ópticas convencionais [50]. Os mesmos pesquisadores, em 2010, desenvolveram uma fibra com uma elevada concentração de térbio,



que possuía uma constante de Verdet de  $-32 \text{ rad/ (Tm)}$ , que é 27 vezes maior do que as fibras ópticas convencionais e corresponde a 83% da constante de Verdet dos cristais comercialmente disponíveis utilizados em isoladores baseados em sensores com cristais [51].

Quando se utiliza fibra como transdutor deve-se resolver o problema da birrefringência linear, que é originada por esforços mecânicos (quando a fibra é dobrada, por exemplo), variações térmicas, imperfeições de fábrica, etc. Essa birrefringência linear reduz significativamente a sensibilidade do sensor devido à degeneração do estado de polarização. Alguns métodos para a compensação da birrefringência linear utilizando propagação da luz refletida foram propostos, tais como espelhos rotativos de Faraday [52] e rotacionadores de polarização em fibra [53], que também dobram a sensibilidade para o mesmo comprimento de fibra.

Na Figura 2.6, um espelho rotacionador de Faraday é mostrado. Este componente conduz a uma mudança de polarização de  $90^\circ$  e a luz que se propaga num eixo é acoplada ao outro eixo, e vice-versa. Uma vez que a birrefringência linear é um efeito recíproco, a diferença de fase introduzida pela birrefringência linear será compensada [52].



**Figura 2.5** - Espelho de Faraday [52]

Por muito tempo, pesquisadores queriam o maior controle e a possibilidade de alterar as propriedades ópticas das fibras. Embora, tenha surgido as fibras torcidas, e sendo elas exploradas por mais de 15 anos tendo grandes avanços na área de sensores de corrente [54-56], ainda assim, as suas propriedades e mecanismos que restringiam as suas aplicações não foram solucionados [57]. Portanto, ainda havia uma necessidade em alterar as características da fibra. Isso ocasionou o desenvolvimento de um novo tipo de fibra, as chamadas Fibras

Microestruturadas ou Fibras de Cristais Fotônicos (PCF - *Photonic Crystal Fiber*) com microestruturas silício-ar [58-59].

A presença de buracos de ar no interior da fibra e por todo o comprimento, possibilita que o contraste entre os índices de refração entre núcleo e casca seja maior que nas fibras convencionais. Assim, era possível confinar a luz em núcleos menores e, portanto, aumentar substancialmente os efeitos não-lineares e o controle da dispersão cromática. Além disso, a luz poderia ser confinada numa região de baixo índice de refração, i.e, num buraco de ar (núcleo oco), apenas pela presença de uma rede periódica desses buracos ao redor da região de confinamento, num funcionamento semelhante ao de um cristal fotônico [60]. Este novo tipo de confinamento da luz permitia, ainda, uma alternativa à reflexão interna total, que só funciona se a região de confinamento da luz possuir índice de refração superior à vizinhança. Desde então, uma variedade de formas e aplicações foram demonstradas em transmissão óptica [16-17].

Na maioria das aplicações de sensoriamento e aplicações que necessitam de luz linearmente polarizada, é necessário um alto grau de birrefringência. Desta forma, as fibras PCF têm se mostrado boas candidatas para este tipo de aplicações, pois devido ao elevado contraste entre os índices de refração da sílica e do ar, é possível introduzir grandes assimetrias na estrutura da PCF [61]. Também, pelo fato de usar um único material na fabricação desses tipos de fibra, passou a existir a possibilidade de criar fibras de alta birrefringências (PCF HiBi) com baixa sensibilidade à temperatura [62], característica muito importante em sensoriamento, permitindo eliminar a sensibilidade cruzada entre a temperatura e outros mensurandos.

Outro aspecto importante é que em sensores com fibras convencionais, é um desafio preservar o estado de polarização, ou seja, em tais fibras, com núcleos perfeitamente circulares, não é possível manter o estado de polarização do campo eletromagnético devido a vários fatores, como indicado em [63]. Com o uso das fibras PCF o estado de polarização do campo óptico pode ser mantido pela introdução da birrefringência. Assim, as fibras PCF HiBi podem ser usadas como elementos ativos em configurações de sensores de fibra óptica utilizando interferência dos modos de polarização [64]. Vale mencionar que, as técnicas mais comuns para aumentar a birrefringência em PCFs são alterar o tamanho do buraco de ar [65] ou distorcer a forma do buraco de ar (buracos de ar elípticos) [65-66] em torno do núcleo da PCF.

### 2.2.3. Sensores de campo magnético

Sensores de campo magnético de fibras ópticas são baseados no efeito magnetostritivo [67]. Esse efeito foi descoberto por Joule há mais de 150 anos e descreve genericamente a mudança nas dimensões dos materiais ferromagnéticos quando sujeitos à campos magnéticos externos. Os elementos sensores magnetostritivos mais comumente utilizados foram fibras ópticas revestidas com níquel [67], vidros metálicos, tais como Metglass 2605 S2 ou Vitrovac 40-60 [68-72] e cerâmica de filmes finos ( $\text{Fe}_2\text{O}_4$ ,  $\text{NiFe}_2\text{O}_4$  ou  $\text{Ni}_x\text{Co}_{1-x}\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) [73-74].

Desde 2000, uma investigação intensiva em um material com alto coeficiente de magnetostricção (Terfenol-D) foi relatada na literatura. A configuração óptica mais estudada é uma forma de haste ou de fita de Terfenol-D ligado a uma rede de Bragg (FBG) [75]. As vantagens deste tipo de sensores são o tamanho pequeno e possibilidade de ter vários elementos sensores na mesma fibra óptica, permitindo assim a multiplexação óptica. Ligas usando Terfenol-D também foram testadas em fibras microestruturadas [76]. Recentemente, um outro tipo de sensores para detectar campos magnéticos tem sido proposto, em que o sensor é baseado no fluido magnético [77]

De modo geral, algumas vantagens desses sensores de campo magnético em comparação com sensores de outros tipos são: baixo custo, simplicidade, de fácil construção, robustez, não há contato entre o imã e o elemento sensor evitando-se assim o desgaste mecânico, grande precisão nas medidas e construção física favorável para a sua utilização em ambientes potencialmente explosivos.

No entanto, estes sensores não estão imunes a campos gerados por outras fontes, as características da magneto-estricção limitam a utilização destes sensores à medição de corrente relativamente baixas e numa gama de frequência muito limitada (baixa frequência), o elemento magneto-estritivo é eletricamente condutor o que elimina a principal vantagem dos sensores e o próprio sensor pode modificar o campo a se medir.

### 2.2.4. Sensores híbridos

Estes sensores combinam a tecnologia óptica com os transdutores de corrente convencionais, transformando a modulação de corrente elétrica em um sinal óptico através de um conversor eletro-óptico [5]. Ou seja, o sistema de detecção é composto por um sensor de

corrente elétrica ou eletrônico, um dispositivo foto-eletrônico e interrogado por sistema de fibra óptica.

As vantagens deste tipo de sistema é o baixo custo e sua facilidade de implementação, por não depender de potência óptica e o sistema de interrogação tem elevado nível de isolamento elétrico devido a fibra óptica o que evita dificuldades associadas com birrefringência, porém a sua dependência com a temperatura limita a precisão das medidas.

Para controlar as configurações de detecção, diversos esquemas de modulação óptica têm sido relatados nos últimos anos, como a modulação de fase óptica [78], modulação de intensidade [79], modulação de frequência [80], modulação de polarização [5] e modulação cromática [81].

### **2.3. Principais sensores comerciais**

Os sensores mais notáveis do mercado serão citados com suas principais características a seguir.

A ABB, antes designada Asea Brown Boveri, empresa líder em tecnologia de energia e automação, é considerada uma das pioneiras no desenvolvimento de sensores de fibra óptica para medidas de corrente elétrica em subestações de alta tensão e tem a linha de produtos mais completa do mercado. Durante muitos anos, a empresa vem progressivamente avançando nesta tecnologia, enquanto trabalhava em estreita colaboração com empresas de energia elétrica na Europa e América do Norte. Essa interação tem dado a ABB uma visão aprofundada sobre as necessidades de seus clientes.

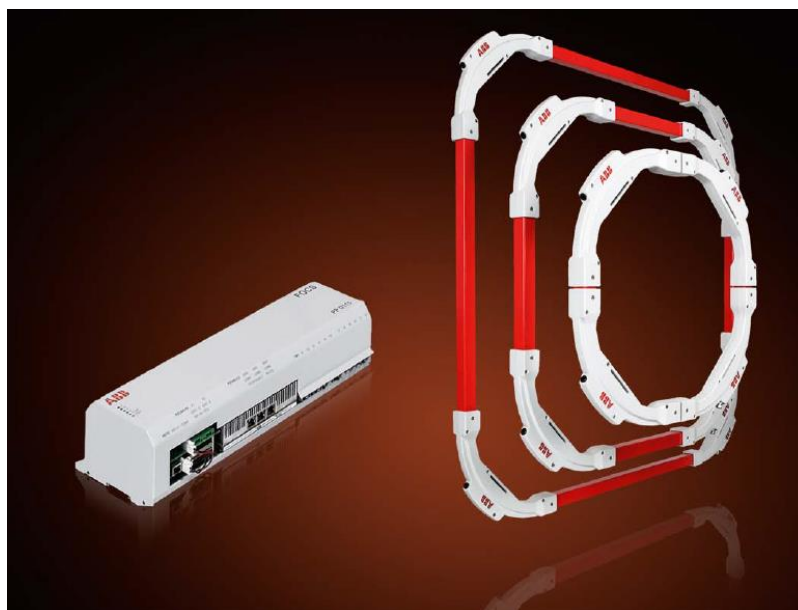
Em 2008, a empresa lançou uma nova geração de transdutor de corrente magneto óptico (MOCT – *Magneto Optical Current Transformer*), transformadores de medida e proteção adequados para redes de alta tensão [82]. A ABB utiliza esses sensores para medição e para aplicações de proteção, as tensões nominais variam entre 72,5 - 800 kV e 50 ou 60 Hz em sistemas de transmissão de energia elétrica. O sistema MOCT-P também é adequado para aplicações ao ar livre, com uma classe de precisão 5TPE de acordo com o IEC 60044-8 para uma classificação de corrente contínua até 4 kA com um limite de precisão de 40x. A largura de banda de 10kHz acrescenta oportunidades na área de produtos de qualidade de energia.

Principais benefícios do novo produto são as várias saídas com velocidades relativamente rápidas 200mV analógico de baixa tensão, capazes de interagir com vários relés microprocessados disponíveis comercialmente. Seu baixo peso permite alta flexibilidade em termos de montagem e facilita o manuseio no local. Uma característica-chave adicional é a reprodução altamente precisa dos acontecimentos de falha, devido à ausência de quaisquer efeitos de distorção magnéticas comuns em transformadores de corrente convencionais com núcleos de ferro. O MOCT-P foi testado de acordo com as mais recentes normas ANSI. A Figura 2.7 mostra o MOCT fabricado pela ABB.



**Figura 2.6** – MOCT da ABB

Atualmente, a empresa ABB tem no mercado FOCS (*Fiber Optical Current Sensor*), que pode ser visto na Figura 2.8 [83]. O FOCS oferece uma precisão de  $\pm 0,1\%$  e uma linearidade de  $\pm 0,1\%$  do valor medido de 1 a 120% da corrente relacionada. A sua instalação é um processo simples, contando com um único cabo de fibra óptica posicionado em volta do condutor, e o suporte de aplicação varia de acordo com a aplicação. Vários tamanhos de suportes são disponibilizados para aplicações em barramentos de metal. O sensor trabalha em valores de corrente de 0 a 500 kA, com capacidade sobre corrente máxima de 20%, podendo chegar à medição de até 600 kA, com taxa de amostragem de 4 kHz. O elemento sensor tem capacidade de trabalhar a temperaturas de  $-40^{\circ}\text{C}$  a  $80^{\circ}\text{C}$ , e o módulo eletrônico opera na faixa de  $-25^{\circ}\text{C}$  a  $65^{\circ}\text{C}$ . O FOCS fornece saída de 0 a 1 V e 0 a 20 mA ou 0,2 a 1 V e 4 a 20 mA se a corrente medida for unidirecional. Para corrente bidirecional a saída varia de  $\pm 1$  V e  $\pm 20$  mA.



**Figura 2.7 – FOCS da ABB**

A empresa Alstom (antiga NxtPhase) possui uma variedade de produtos da linha NXCT de sensores de corrente baseados em fibra óptica. Sua linha de produtos possui um nível de precisão em uma variação de corrente entre 1 A<sub>RMS</sub> e 63 kA<sub>RMS</sub>. De acordo com a necessidade, pode-se optar por configurações que suportem níveis máximos de tensão, indo de 72,5 kV a 800 kV. Os sensores são instalados utilizando um suporte isolante, cujo design permite a montagem em pedestal ou na forma suspensa em um barramento rígido. Sua precisão excede as classes IEC 0,2S e IEEE 0,3, 0,15% para medição e as classes IEC 5P e IEEE 10% para proteção.

O COSI-CT faz parte da gama de sensores de corrente baseados em fibra óptica da linha NXCT [84]. O COSI-CT, visto na Figura 2.9, pode trabalhar na faixa de tensão de 72,5 kV a 800 kV e opera em uma largura de banda de 0,5 Hz a 6kHz. A temperatura de serviço varia de -40°C a 55°C, em condições de serviço em ambiente externo, e o módulo Opto-Eletrônico opera a uma faixa de -5°C a 40°C em condições de serviço em ambiente interno. O conjunto possui ainda o módulo de processamento, capaz de fornecer uma tensão de saída de 4 V para aplicações de medição ou 200 mV para aplicações de proteção, com erro de 0,2% e 0,5% respectivamente.

O COSI-CT F3 é uma variação do COSI-CT, cuja vantagem é a utilização do elemento sensor como um cabo de fibra óptica flexível. Desta forma se pode instalar e retirar o sensor de corrente sem que o circuito a ser monitorado seja desligado. Além disso, torna-se um equipamento mais portátil e modular.



**Figura 2.8** - COSI-CT da NxtPhase

A empresa AIRAK desenvolveu um sensor de corrente com base em fibra óptica (Figura 2.10) para monitorar linhas de distribuição elétrica de média tensão [85]. O sensor é muito leve (0,57 kg) e tamanho pequeno (cerca de 28 x 18 x 16 cm). Quanto aos detalhes técnicos, o sensor atende as normas IEEE, a classe de isolamento de 36kV, opera em uma faixa de frequência de 5 Hz a 20 kHz, tem uma resolução menor do que 1%, possui faixa de temperatura de -40 °C a 70 °C, e tem uma medição de escala completa de 30 A a 30 kA.



**Figura 2.9** – FOECT-3000 da AIRAK

O sensor de corrente DISCOS da PowerSense [86], mostrado na Figura 2.11, desenvolvido para a medição de corrente AC de 5 A a 20 kA, emprega um vidro BK7 e fornece um erro máximo de 2% e precisão de  $\pm 2$  A na faixa de 5 A a 100 A e faixa de temperatura de -20 °C a 75 °C.



**Figura 2.10** – DISCOS da POWERSENSE

Até aqui foram expostos os princípios de funcionamento e desvantagens dos TCs em comparação com os sensores ópticos de corrente. Além disso foi mostrado alguns dos principais sensores comerciais. Desta forma, a partir dos próximos capítulos será mostrado o desenvolvimento e caracterização dos sensores propostos neste trabalho.



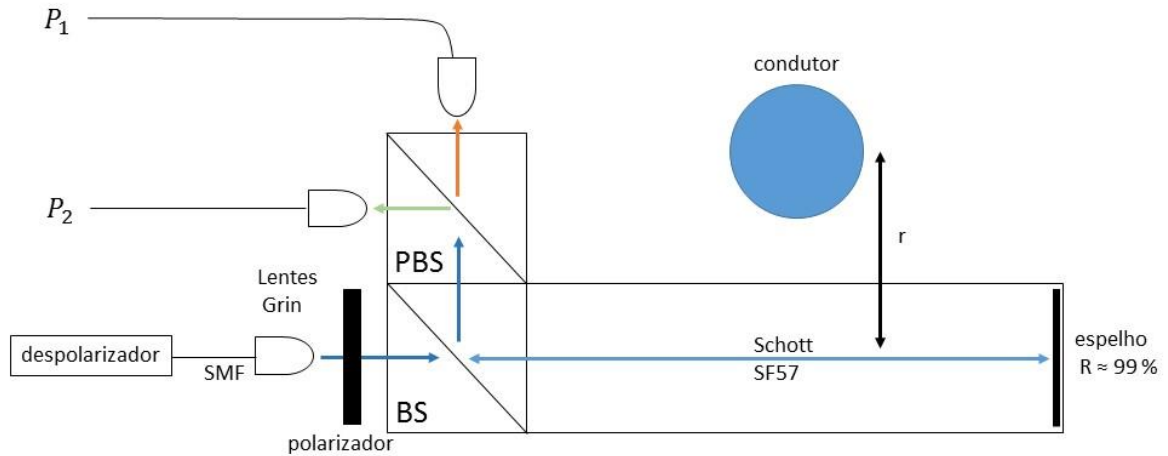
# Prisma sensor de SF57

Durante a execução do projeto de pesquisa foi desenvolvido uma configuração mais simples e versátil do protótipo para estudos preliminares. Esta configuração consistiu na utilização de um vidro óptico como meio de detecção, permitindo a possibilidade de ser instalado na linha de alta potência, sem interrompê-la e também proporcionar a possibilidade de detectar transitórios, que ocorrem na gama de frequências de dezenas a centenas de kHz.

Na configuração escolhida foi usado um prisma de vidro Schott SF57, com alta constante de Verdet, baixa birrefringência linear e coeficiente elasto-óptico reduzido [22]. Este último parâmetro foi crucial no desenvolvimento do protótipo, permitindo projetar uma cápsula para o sensor, sem introduzir birrefringência linear no vidro óptico, devido à pressão.

Também procurou-se definir qual configuração polarimétrica seria utilizada no sensor. Desta forma, após alguns ensaios com diferentes configurações simples e em dupla quadratura, optou-se pela configuração em dupla quadratura. Esta configuração, permite aumentar a sensibilidade e eliminar várias fontes de ruídos que afetam os dois sinais de forma idênticas e uma resposta independente da potência óptica.

O esquema do sensor desenvolvido é representado na Figura 3.1, na qual a radiação da fonte de banda larga despolarizada é injetada na cabeça de detecção através de uma lente GRIN monomodo. O polarizador de entrada é orientado a  $\pm 45^\circ$  em relação ao divisor de polarização na saída - PBS (do inglês *polarizing beam splitter*) para operar com a mais alta sensibilidade. Enquanto se propaga através do prisma magneto-óptico de 80 mm, o plano de polarização da luz roda na presença de um campo magnético. Um espelho de alta refletividade na extremidade do vidro inverte o sentido de propagação, e a rotação Faraday acumula devido à sua não-reciprocidade.



**Figura 3.1** – Esquemas representando a configuração do prisma sensor de corrente em dupla quadratura.

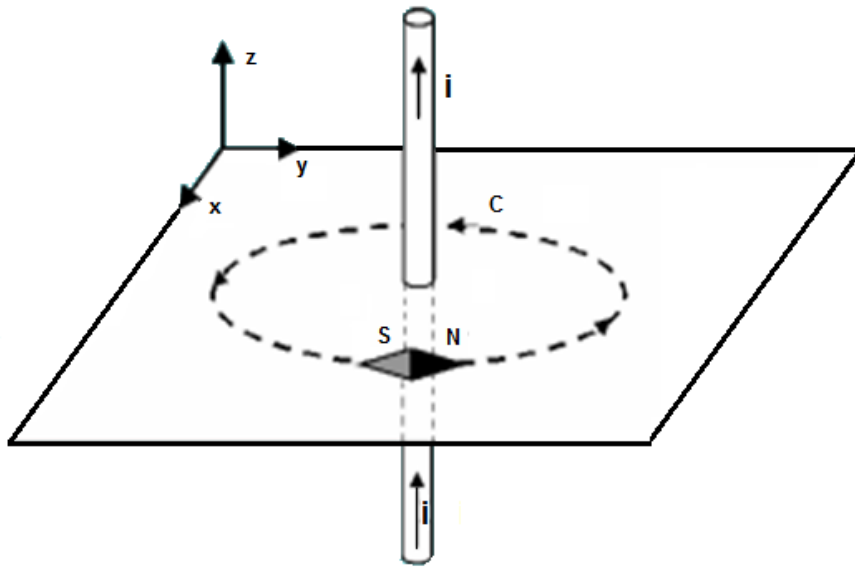
No final, um divisor de potência – BS (do inglês *beam splitter*) reflete a radiação em direção a um divisor de polarização que separa as duas polarizações ortogonais em duas saídas distintas que, quando combinadas, produzem um sinal independente de flutuações de energia óptica indesejáveis. As duas saídas são coletadas usando duas lentes GRIN multimodo em vez de monomodo, tornando-se menos suscetíveis a desalinhamentos e coletando sinais ópticos maiores. Para maximizar a rotação de Faraday o condutor deve ser colocado perpendicularmente e centrado em relação ao prisma.

### 3.1. Rotação de Faraday do sensor

A fim de calcular a rotação de Faraday, de acordo com a Equação 1.4, é necessário conhecer a componente do campo magnético ao longo da direção de propagação da luz no sensor. Do eletromagnetismo clássico sabemos que [87]:

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 I \quad (3.1)$$

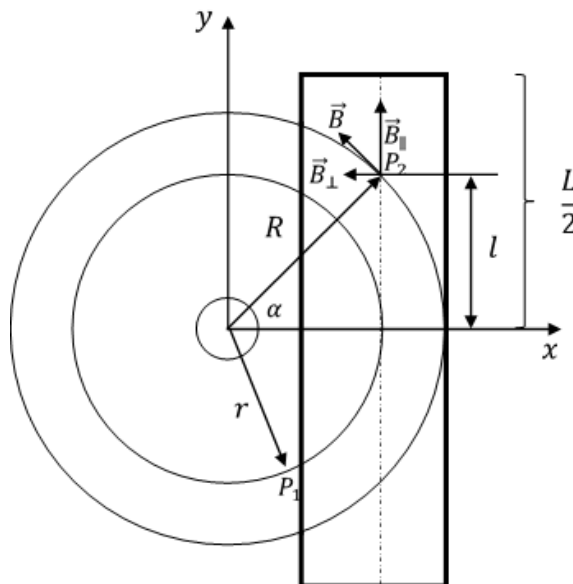
Onde  $\vec{B}$  corresponde à densidade de fluxo magnético, proporcional ao campo magnético  $\vec{H}$ ,  $d\vec{l}$  é o elemento de linha orientado na direção de integração e  $I$  é a corrente nesse percurso fechado. Essa equação é conhecida como Lei de Ampere. Dada a geometria do problema, onde  $\vec{B}$  é gerado por um condutor perpendicular ao sensor, e  $\vec{B}$  é paralelo a  $d\vec{l}$  (ver Figura 3.2).



**Figura 3.2** - Simetria do sistema para aplicação da Lei de Ampere

Neste caso a simetria sugere que as linhas de indução são círculos concêntricos e o módulo do vetor  $\vec{B}$  é constante ao longo de cada linha.

Considere a cabeça sensora de comprimento  $L$ , centrada e perpendicular ao eixo do condutor, como mostrado na Figura 3.3.



**Figura 3.3** – Representação do campo magnético na proximidade do condutor, sendo  $L$  o comprimento do prisma.

A amplitude da intensidade do campo magnético paralelo ao longo do percurso de propagação da luz é descrita como:

$$B_{||} = B \cdot \cos(\alpha) \quad (3.2)$$

Assim, para uma linha de raio  $r$  conforme indicado no ponto  $P_1$  na Figura 3.3, a integração é igual ao módulo desse vetor multiplicado pelo comprimento da circunferência [87]:

$$B_r = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \quad (3.3)$$

sendo,  $I$  a corrente que flui no condutor e  $\mu_0$  a permeabilidade magnética no vácuo.

Entretanto, à medida que a radiação se afasta do centro do sensor o valor do campo magnético decresce, pois este é inversamente proporcional ao raio. Desta forma, a expressão geral para o campo magnético em qualquer posição é [87]:

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi\sqrt{r^2+l^2}} \quad (3.4)$$

sendo  $l$  a distância ao ponto médio do prisma.

Considerando que apenas a componente do campo magnético paralela à direção de propagação da luz contribui para uma rotação de Faraday e substituindo a Equação 3.4 na Equação 3.2, obtemos:

$$B_{||} = \frac{\mu_0 I}{2\pi(r^2+l^2)} \quad (3.5)$$

Substituindo a Equação 3.5 na equação 1.4, a expressão para a rotação de Faraday torna-se:

$$\theta_f = V \frac{\mu_0 I}{\pi} \arctan\left(\frac{L}{2r}\right) \quad (3.6)$$

Na próxima seção o cálculo da função de transferência do sensor, baseado em matrizes de Jones é discutido.

### 3.2. Função de transferência do sensor

Recorrendo ao formalismo de Jones apresentado no Capítulo 1, é possível definir um operador matricial para cada componente óptico da configuração descrita na Figura 3.1 e obter uma expressão analítica para o sinal de saída do sensor. Estes operadores matriciais são mostrados na tabela 3.1 [12-13]:

**Tabela 3.1** – Matriz de Jones

Elemento óptico	Matriz de Jones
Estado de polarização inicial	$\vec{E}_{in} = \begin{bmatrix} E_0 \\ 0 \end{bmatrix}$
Polarizador orientado a $\theta_f$ graus do eixo horizontal	$\mathbf{P}[\theta_f] = \begin{bmatrix} \cos^2\theta_f & \cos(\theta_f)\sin(\theta_f) \\ \cos(\theta_f)\sin(\theta_f) & \sin^2\theta_f \end{bmatrix}$
Efeito de rotação de polarização	$\mathbf{V}[\theta_f] = \begin{bmatrix} \cos(\theta_f) & -\sin(\theta_f) \\ \sin(\theta_f) & \cos(\theta_f) \end{bmatrix}$
Espelho	$\mathbf{Esp} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}$
Divisor de potência 50/50	$\mathbf{DP} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$

sendo,  $\vec{E}_{in}$  a amplitude do campo elétrico na entrada do sistema óptico,  $\mathbf{P}[\theta_f]$  representa a matriz do polarizador,  $\mathbf{V}[\theta_f]$  a matriz de rotação,  $\mathbf{Esp}$  a matriz do espelho,  $\mathbf{DP}$  a matriz do divisor de potência e  $\vec{E}_{out}$  a amplitude do campo na saída do sistema.

Dessa forma, as expressões para o vetor campo elétrico na saída do sensor de quadratura apresentado na Figura 3.1, são descritas por:

$$\vec{E}_{out_1} = \mathbf{P}[+45^\circ] \mathbf{DP} \mathbf{Esp} \mathbf{V}[-\theta_f] \mathbf{Esp} \mathbf{V}[\theta_f] \mathbf{DP} \vec{E}_{in} \quad (3.7)$$

$$\vec{E}_{out_2} = \mathbf{P}[-45^\circ] \mathbf{Esp} \mathbf{DP} \mathbf{Esp} \mathbf{V}[-\theta_f] \mathbf{Esp} \mathbf{V}[\theta_f] \mathbf{DP} \vec{E}_{in}$$

Sabendo que a intensidade luminosa pode ser calculada pelo módulo ao quadrado do vetor campo elétrico, tem-se:

$$P_1 = \frac{1}{16} E_0^2 [1 + \text{sen}(4\theta_f)] \quad (3.8)$$

$$P_2 = \frac{1}{16} E_0^2 [1 - \text{sen}(4\theta_f)]$$

Estas equações demonstram que apenas 1/16 da potência da fonte despolarizada atinge cada saída. As duas saídas são, efetivamente, dois sinais em oposição de fase adequados à implementação do processamento soma/diferença:

$$S = \frac{P_1 - P_2}{P_1 + P_2} = \text{sen}(4\theta_f) \approx 4\theta_f \quad (3.9)$$

Assim, podemos fazer uma previsão do comportamento dos sinais ópticos à saída do sensor em função da corrente elétrica que circula no condutor. Mesmo para correntes relativamente elevadas, a rotação de Faraday resulta em pequenos ângulos [88]. Desta forma a operação do sensor deverá ocorrer na gama de operação linear, em que a aproximação  $\text{sen}(\theta) \approx \theta$  é válida. Nestas condições a modulação do sinal óptico é diretamente proporcional ao campo magnético e logo à corrente que passa no condutor.

### 3.3. Caracterização do sensor

Na Figura 3.4 é mostrada uma fotografia dos primeiros estágios da montagem experimental no laboratório com o laser operando a 633 nm e com a fonte de corrente usada para gerar o campo magnético.



Figura 3.4 – Fotografia da montagem experimental

#### 3.3.1. Sensibilidade em relação ao ângulo entre entrada e saída polarizada

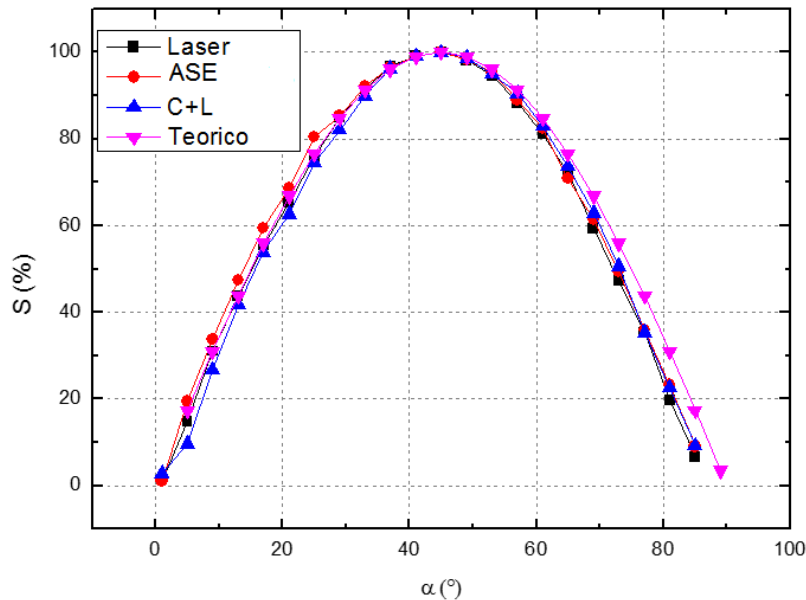
Para encontrar a sensibilidade em relação ao ângulo entre entrada e saída polarizada, um experimento preliminar foi feito usando laser DFB a 1570 nm, uma fonte de Emissão espontânea amplificada - ASE (do inglês *amplified spontaneous emission*) a 1550 nm e uma fonte de Banda C+L (1530nm até 1625nm). Deve-se mencionar que estas fontes foram utilizadas por serem as únicas disponíveis na época do estágio nos laboratórios do INESCTEC.

Para se obter o comportamento desta sensibilidade foi considerado a resposta e a tolerância do sensor ao desalinhamento dos polarizadores. Considerando seu ângulo relativo como sendo um ângulo genérico  $\alpha$ , a Equação 3.9 torna-se:

$$S = \cos^2(2\alpha - 4\theta_f) \quad (3.10)$$

Para tal experimento, o valor da corrente foi fixado e o polarizador de entrada foi variado de 4 em 4°, após isso o valor da amplitude do sinal lido no fotodetector foi registrado com o

Lock-in Assumindo uma rotação de Faraday nula, observa-se na Figura 3.5 que para  $45^\circ$  se obtém a máxima sensibilidade, e que para ângulos entre  $40^\circ$  e  $50^\circ$  a redução de sensibilidade do sensor não é muito significativa (variação  $< 5\%$ ). Também, verifica-se que o alinhamento dos polarizadores apresenta uma tolerância razoável a pequenos desalinhamentos angulares.



**Figura 3.5** – Derivada da saída do sinal em função do ângulo entre polarizadores para diferentes fontes ópticas utilizadas para iluminar o sensor.

Também é observado que os resultados experimentais reproduzem o comportamento da curva teórica obtida de acordo com a Equação 3.10, de modo que é possível concluir que tais resultados experimentais não dependem do tipo de fonte utilizada.

No entanto, numa situação prática é provável que as perturbações ambientais, como a pressão, vibração e a influência da temperatura na fibra de entrada irão inevitavelmente afetar a polarização, pois irão provocar alteração na constante de Verdet, através de birrefringência linear induzida por micro-curvaturas provocando flutuações de potência ao passar no primeiro polarizador.

Entretanto, no prisma de SF-57 isto não é crítico porque o coeficiente elasto-óptico é muito baixo. Em tal situação, fontes com grau de polarização elevado, como o laser, são mais susceptíveis a estas perturbações. Estes resultados são importantes pois mostram que a configuração proposta apresenta uma tolerância bastante relaxada no alinhamento dos



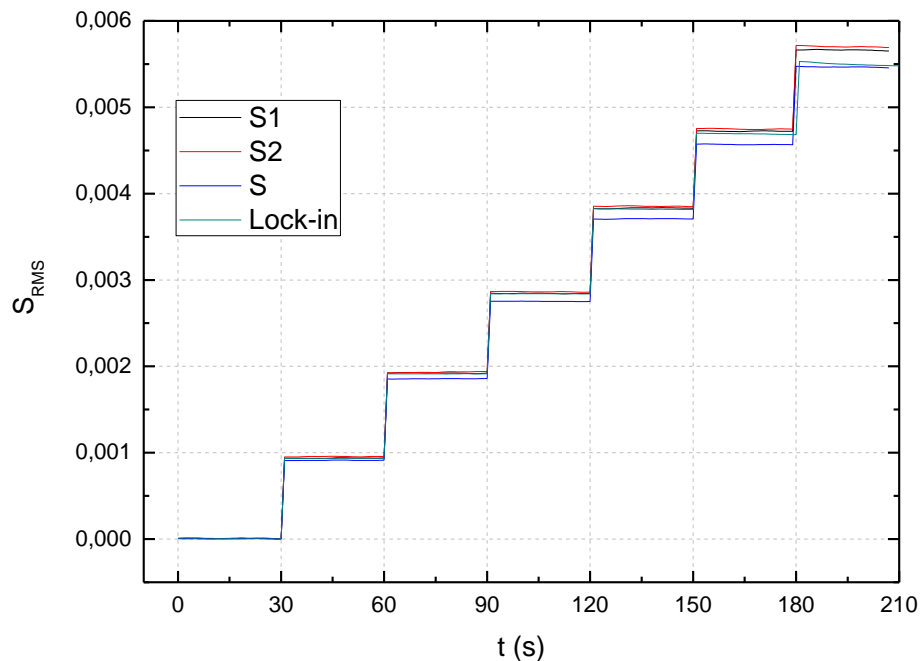
polarizadores o que irá facilitar bastante a montagem do sensor num suporte adequado ao seu uso como protótipo portátil.

### 3.3.2. Resposta do sensor como função de frequência

Para saber se a resposta do sensor dependia da frequência da rede elétrica, o sensor foi submetido a correntes elétricas em torno das frequências de 50, 60, 100, 250 e 400 Hz.

Para uma caracterização do sensor, o mesmo foi colocado a cerca de 4 cm da fonte de corrente. Foi utilizado o amplificador lock-in SR850 DSP (*Digital Signal Processing*) ajustado com uma frequência de amostragem de 2Hz, tempo de amostragem de 125 ms e largura de banda de 1,2Hz (125mHz) [89] e uma DAQ NI 6251 (Data Acquisition) [90], com uma resolução de 1,92mV e um Osciloscópio (PM 3209 40MHz, da Philips), para registrar os valores de amplitude da componente alternada do sinal eletrônico em função do tempo.

O sensor foi então submetido a incrementos sucessivos de corrente de aproximadamente 71  $A_{RMS}$ , com variações entre 0 e 500  $A_{RMS}$ , obtendo o registro temporal apresentado na Figura 3.6. O desvio padrão ( $\sigma_{RMS}$ ) é calculado para cada patamar de corrente considerando intervalos de 30 segundos.



**Figura 3.6** – Fonte SLD 830nm medidos a 40dB. Variação da tensão de pico a 80 Hz para sete incrementos sucessivos de aproximadamente 71  $A_{RMS}$ .

A calibração preliminar do sensor pode ser vista na Figura 3.7, com o sinal de saída RMS detectado, em função do valor de corrente RMS que passa no condutor.

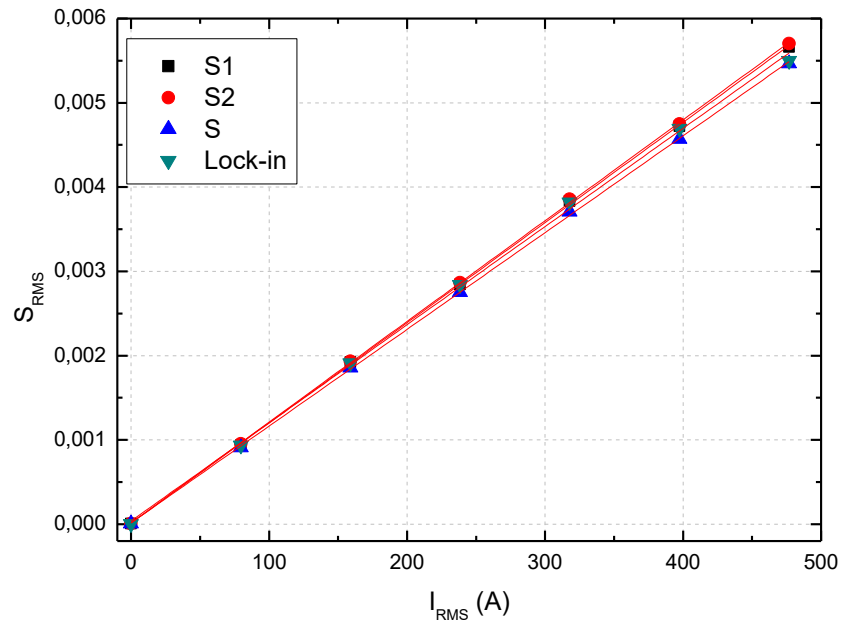


Figura 3.7 – Calibração do sensor entre os 0A e os 500A.

Na Figura 3.8 são apresentados os resultados combinados de todos os testes com diferentes frequências mostrando uma resposta linear muito boa e independente da frequência do sinal com um fator de correlação de 0,9998.

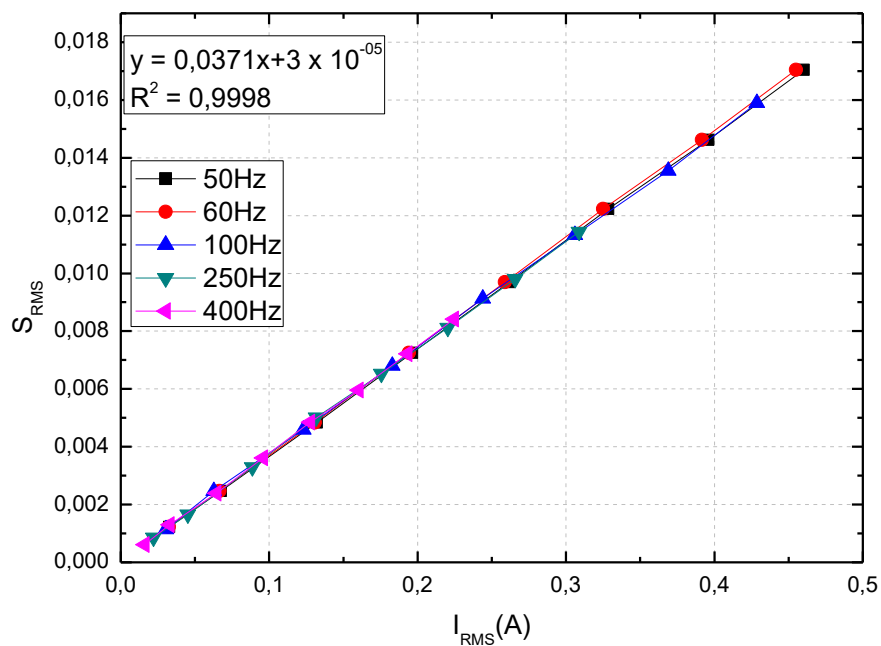


Figura 3.8 - Resposta do sensor em função da corrente obtida para diferentes frequências entre 50Hz e 400 Hz.

Devido à limitação prática dos componentes eletrônicos, a frequência mais alta testada foi de 400 Hz, no entanto, considerando as características intrínsecas do sensor, a largura de banda será limitada apenas pela especificação da eletrônica de detecção.

### 3.3.3. Largura de banda do sensor

Para estimar a capacidade do sensor para monitorar sinais transitórios, é importante conhecer sua largura de banda intrínseca. No domínio óptico, a largura de banda máxima é limitada pelo tempo mínimo de propagação da luz dentro do vidro Schott SF57.

A largura de banda máxima deste sensor em particular pode ser calculada como o inverso do tempo de propagação da luz que passa através do sensor, conforme:

$$LB = \frac{1}{\tau} = \frac{c}{2Ln} \quad (3.11)$$

com  $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ ,  $L = 8 \text{ cm}$  e  $n = 1,8373$  (que é o índice de refração do material em 650 nm),  $n = 1,8216$  (que é o índice de refração do material em 830 nm) e  $n = 1,8015$  (que é o índice de refração do material em 1570 nm). Pode-se estimar a largura de banda intrínseca do sensor de 102,05 MHz a 650 nm, 102,93 MHz a 830nm e 104,07 MHz quando opera na faixa dos 1550nm [91].

O sensor demonstra assim ter potencial para medir fenômenos muito rápidos envolvendo correntes elevadas, tal como a ocorrência de transitórios. Na prática, a largura de banda do sensor será determinada pelo valor mais baixo da largura de banda de cada elemento do sistema, como o fotodetector ou sistema de detecção do sinal, um lock-in amplificador ou um dispositivo de aquisição de dados (DAQ).

Quando o interesse é a aplicação de medição ou caracterização inicial da resposta do sensor como uma função de uma corrente conhecida, o lock-in amplificador, com filtro muito estreito em torno das frequências de interesse, podem ser usados. Se, por outro lado, a ideia consiste em medir impulsos de corrente muito rápidos, normalmente causadas por um curto-circuito na rede, será necessário utilizar um sistema de detecção eletrônico de alta velocidade.

### 3.3.4. Sensibilidades e Resoluções obtidas em diferentes comprimentos de onda

Para avaliar a possibilidade de utilizar a configuração de sensor da Figura 3.1 em comprimentos de onda de telecomunicações (tipicamente da ordem de 1550 nm), o protótipo foi testado com diferentes fontes de banda larga que se encontravam disponíveis nos Laboratórios do INESC TEC. A escolha foi definida de acordo com o grau de polarização da fonte em estudo, sendo tal parâmetro definido como:

$$GP = \frac{P_{m\acute{a}x} - P_{m\acute{i}n}}{P_{m\acute{a}x} + P_{m\acute{i}n}} \quad (3.12)$$

onde  $P_{m\acute{a}x}$  e  $P_{m\acute{i}n}$ , representam a potência máxima e mínima, respectivamente, após passagem da radiação por um despolarizador com diferentes orientações relativas ao plano de polarização da radiação. O grau de polarização deve idealmente ser reduzido de forma a evitar flutuações de potência à entrada do sensor. Os resultados obtidos revelaram um grau de polarização de 85 % para a fonte laser (DFB-10mW a 1570 nm) [92] e cerca de 7,5 % para as fontes de banda larga (SLD). Dessa forma, optou-se pela escolha das fontes SLD (*superluminescent diode*), centradas nos comprimentos de onda e suas respectivas potências de saída e larguras de banda, conforme mostrada na Tabela 3.2.

**Tabela 3.2** – Fontes de banda larga SLD e potências de saída

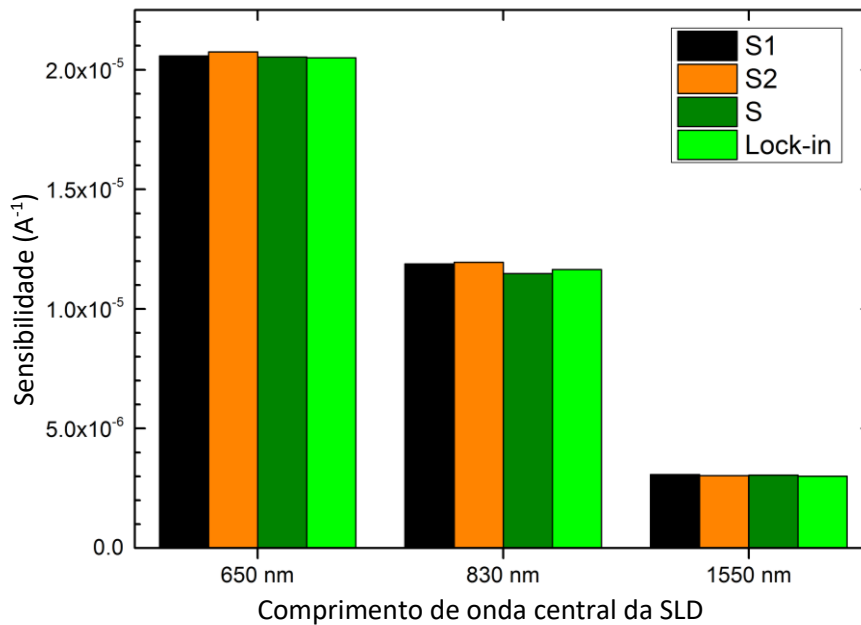
Fonte	Potência de saída	Largura de banda espectral 3dB	Potência na saída S1	Potência na saída S2	Detector da Thorlabs	Ganho no detector
SLD 650 nm	2,5 mW	6,2 nm	5,3 $\mu$ w	2,8 $\mu$ w	PDA100A-EC	20 kHz
SLD 830 nm	7,8 mW	19,7 nm	19,12 $\mu$ w	14,07 $\mu$ w	PDA100A-EC	225 kHz
SLD 1550 nm	22,5 mW	50 nm	434,10 $\mu$ w	232,00 $\mu$ w	PDA10-CS	775 kHz

Na configuração da cabeça do sensor, a maior parte da potência óptica foi perdida no polarizador de entrada (50%), divisor de feixe (50% do que restou), e nas lentes GRIN (7%), adicionando a outras perdas residuais nas emendas, conectores e reflexões parasitas. Como resultado, o sinal óptico que incidia nos fotodetectores era relativamente pequeno levando a uma degradação da relação sinal-ruído exigindo elevada amplificação de ganho e filtragem, e assim impondo limitações na largura de banda.

A medida da sensibilidade e da resolução foram realizadas, considerando a operação com as diferentes fontes ópticas e optoeletrônica de detecção, usando um filtro passa-faixa de

largura de banda de 125mHz na fase de detecção, e submetendo o sensor a seis passos de incrementos de corrente de  $75A_{RMS}$ , em 80Hz, por 30s cada, de  $75A_{RMS}$  a  $500A_{RMS}$ .

Um indutor foi usado para gerar um campo magnético senoidal bem definido e estável. A partir do campo magnético medido, a corrente equivalente foi determinada para gerar o campo magnético em uma situação prática com um único condutor 4 cm a partir do sensor. Com este procedimento, foi possível obter a resposta do sensor e as respectivas curvas de calibração ao operar em diferentes comprimentos de onda. Com estes dados, uma estimativa da sensibilidade do sistema foi determinada. A comparação dos resultados obtidos com cada fonte óptica pode ser feita na Figura 3.9, onde é mostrada a sensibilidade normalizada como função do comprimento de onda.

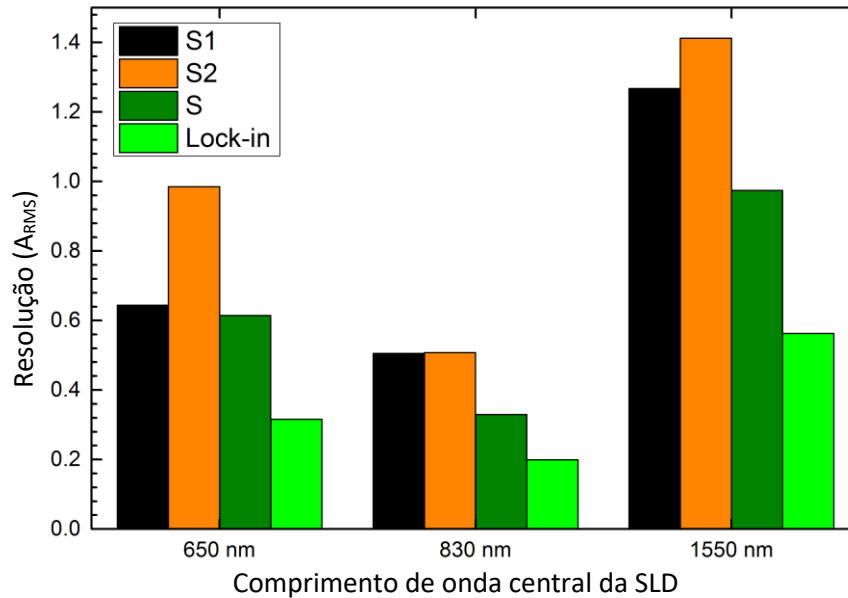


**Figura 3.9** – Sensibilidade do sensor para várias fontes ópticas

Como esperado, a sensibilidade diminui rapidamente com o aumento do comprimento de onda, devido à diminuição da constante de Verdet de acordo com a Equação 1.5.

A resolução do sensor é estimada considerando que o valor mínimo detectável é dado por duas vezes o desvio padrão do sinal, dividido pela inclinação da curva de calibração,  $m$  (definida por  $m = S_{RMS}/I_{RMS}$ ). O menor valor obtido em toda a gama de corrente medida foi considerada como a melhor resolução do sensor.

A Figura 3.10 mostra a resolução correspondente para os sinais em quadratura ( $S_1$  e  $S_2$ ) e para o sinal processado  $S$ . Estas medidas foram realizadas antes do encapsulamento do sensor.



**Figura 3.10** – Resolução do sensor para várias fontes ópticas

Verificou-se que a melhor resolução se conseguiu com a fonte SLD 830 em todas as saídas lidas tanto pela DAQ quanto pelo Lock-in, tendo uma melhoria de 1,86 vezes em comparação com os resultados a 650 nm. Este resultado é justificado pela maior potência óptica do SLD a 830 nm, em comparação com a de 650 nm, levando a uma maior relação sinal-ruído. Além disso, os fotodetectores são cerca de 1,29 vezes mais sensíveis a fótons no comprimento de onda de 830 nm do que a 650 nm, devido à responsividade do silício. No entanto, embora a fonte óptica a 1550 nm tenha o dobro da potência, em comparação com a de 830 nm, a sensibilidade intrínseca em relação a esse comprimento de onda foi de 3,7 vezes menor, resultando em resolução degradada.

Verifica-se também que o processamento em dupla quadratura proporcionou melhor resolução em comparação aos sinais processados individualmente. Comparando  $S$  com  $S_1$  houve uma melhora de 4,6, 34,7, e 23,1% na resolução em 650, 830 e 1550 nm, respectivamente, demonstrando a eficácia do sistema de processamento de sinais.

A constante de Verdet do material SF57 a 650 nm é de 21rad/(Tm). Com base nas sensibilidades obtidas, foi possível estimar a constante de Verdet para os comprimentos de onda mais elevados [19]. Os valores da constante de Verdet foram 11,74 rad/(Tm) e 3,12rad/(Tm) para 830 nm e 1550 nm, respectivamente.

Além disso, embora a equação 3.9 mostre que a função de transferência do sensor seja senoidal, para uma gama limitada de pequenos ângulos ela pode ser considerada linear.

Ajustando o erro máximo tolerável a 1%, uma região linear pode ser definida considerando  $|\Delta\theta| < 0,244$  rad [88]. Com  $r = 4$  cm,  $L = 8$  cm e  $V(650\text{ nm}) = 21\text{ rad/T.m}$ , a resposta linear aumentou para 9,7 kA. Para o funcionamento a comprimentos de onda mais elevados, a região linear do sensor aumentou para 17,35 kA a 830 nm e 65,28 kA a 1550 nm.

A largura de banda intrínseca máxima do transdutor é em torno de  $\sim 1$  GHz. No entanto, tendo em conta as limitações dos sistemas eletrônicos (fotodetectores, aquisição digital) e o impacto da potência óptica disponível na relação sinal/ruído, a largura de banda dos sistemas testados foi limitada a 100 kHz. No entanto, este valor pode ser aumentado usando uma fonte óptica com maior potência de saída que permitiria reduzir os requisitos de ganho, aumentando assim a largura de banda, e também usando placas de aquisição com melhor desempenho. Além disso, esse valor de largura de banda, já é adequado para a maioria dos aplicativos de medição e proteção.

# Protótipo do prisma sensor de SF57

Neste Capítulo, os detalhes da confecção do protótipo do sensor de corrente elétrica desenvolvido e caracterizado no Capítulo 3 são mostrados e discutidos.

## 4.1. Prisma sensor

Após a escolha do comprimento de onda 830 nm, como sendo o ideal (mostrado no Capítulo 3), o sensor então, foi testado para avaliar sua viabilidade como um sistema versátil de medição e proteção em redes de alta potência. Na Figura 4.1 é mostrada a configuração completa usada para o teste experimental do protótipo.

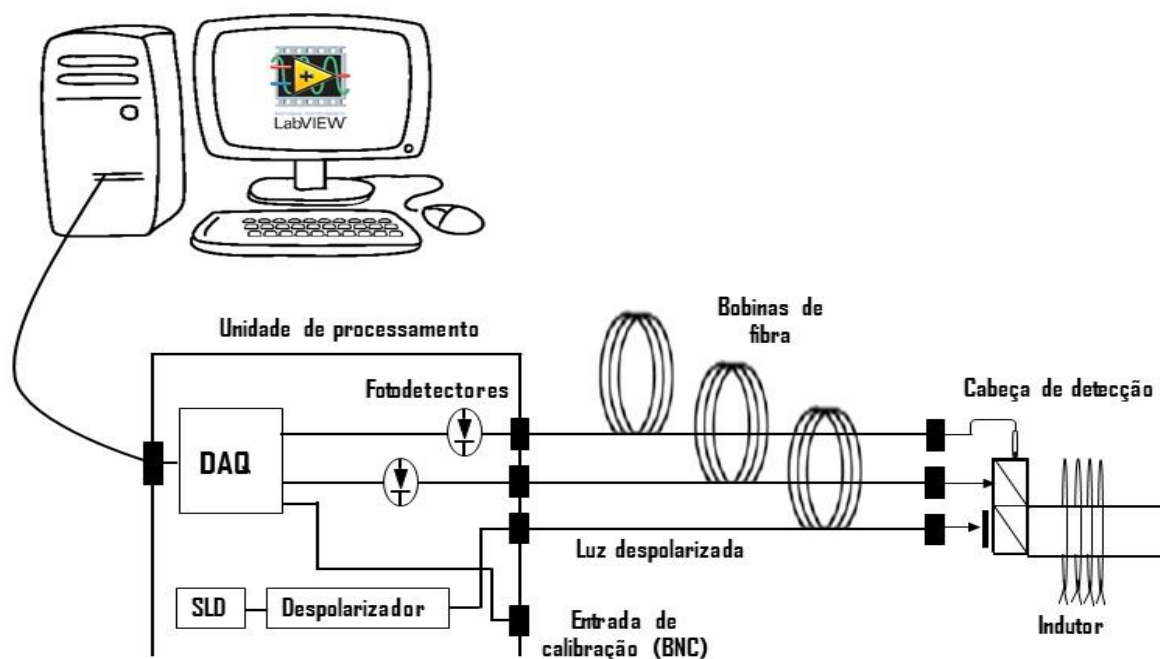


Figura 4.1 – Configuração para medição de campo magnético



A unidade de processamento contém uma fonte SLD e um despolarizador, usado para excitar a cabeça de detecção através de uma fibra monomodo. O sensor foi composto por um polarizador à entrada, seguido de um cubo divisor de potência, um cristal com 8 cm de comprimento e um cubo divisor de polarização, onde são divididas as duas polarizações ortogonais. Para a detecção dos sinais ópticos de entrada, modulados pelo campo magnético, são utilizados dois fotodetectores com pré-amplificação. Uma placa USB DAQ 6363 é usada para a aquisição digital dos sinais detectados. O sistema também possui uma conexão USB, permitindo o controle por meio de um PC com programa Labview feito sob encomenda, onde ocorre o controle digital e processamento de sinais. Três cabos ópticos com 20 m de comprimento foram usados para ligar a cabeça do sensor a esta unidade de interrogação.

#### **4.2. Encapsulamento do sensor óptico**

Inicialmente foi escolhido o material a ser utilizado no suporte do sensor. O encapsulamento desenvolvido tem como objetivo o transporte do sensor e sua fixação na linha de alta tensão, assim como a medição de corrente, implicando a exposição do sensor a temperaturas elevadas, na ordem dos 80°C. Nesta situação optou-se pela escolha de um material dielétrico (não condutor) e que tivesse uma gama de temperatura ampla e o ponto de fusão muito superior a 80°C.

Em testes efetuados no laboratório foi verificado que o alinhamento das lentes de GRIN à saída do sensor era extremamente sensível a variações micrométricas da sua posição em relação ao feixe óptico. Neste contexto, pretende-se que o sensor seja pouco sujeito à expansão térmica do material que o suporta. Para tal, foi utilizado o material Nylon, que possui um baixo coeficiente de dilatação linear. Vale mencionar que a escolha deste material se deu porque era o que estava disponível quando a montagem do protótipo foi realizada. Além disso, este material podia ser facilmente maquinado (usinado).

Considerando que este protótipo é de um sensor de campo magnético, é necessário que o material escolhido influencie o mínimo possível na propagação do mesmo. Logo, o coeficiente de permeabilidade magnética relativa do material deve ser o mais próximo do vácuo, isto é,  $\mu_r = 1$ .

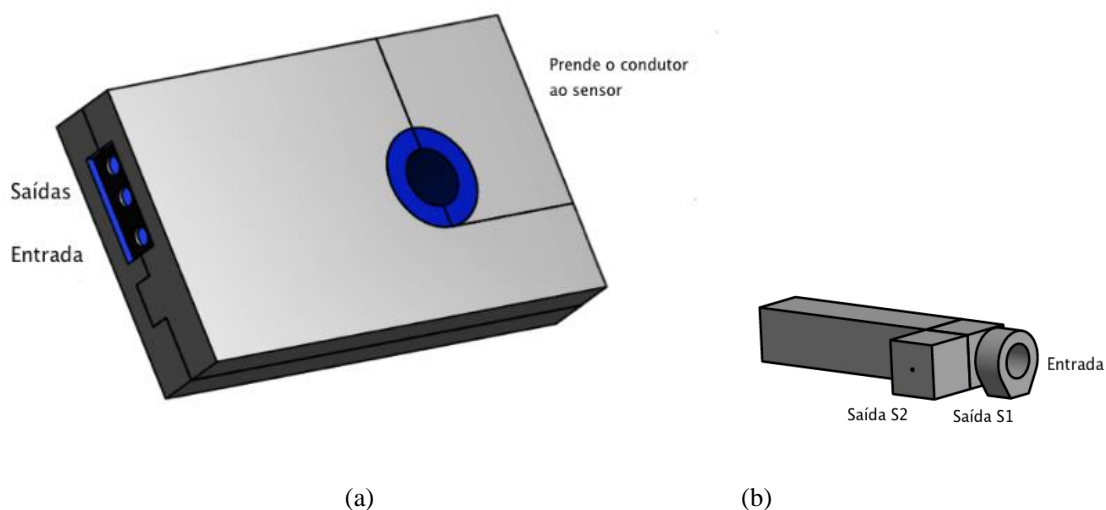
Na Tabela 4.1 é apresentada a lista de materiais, assim como algumas das suas propriedades térmicas e magnéticas. Levando-se em conta as considerações apresentadas, o Nylon foi escolhido.

**Tabela 4.1** – Lista de materiais analisados para suporte do sensor.

Material	Gama de temperatura (°C)	Ponto de fusão (°C)	Coefficiente de dilatação linear (K <sup>-1</sup> )	Permeabilidade magnética relativa (μ <sub>r</sub> )
Teflon	20 a 100	327	1,6x10 <sup>-4</sup>	4,2
Acrílico		130	7,0x10 <sup>-5</sup>	21
Vidro	20 a 300	1600	8,6x10 <sup>-6</sup>	4 a 10
PVC	-30 a 50	82,5	8,0x10 <sup>-5</sup>	
Alumínio		660	2,4x10 <sup>-5</sup>	1
ZELLAMID ® 1500 (PEEK)	até 260		4,7x10 <sup>-5</sup>	
Madeira			Sentido das fibras: 0,3x10 <sup>-5</sup> Sentido transversal às fibras: 3 x10 <sup>-5</sup>	1
Fibra de Vidro			1,7 x10 <sup>-5</sup>	
Nylon	-70 a 99	216	8,0x10 <sup>-5</sup>	~1

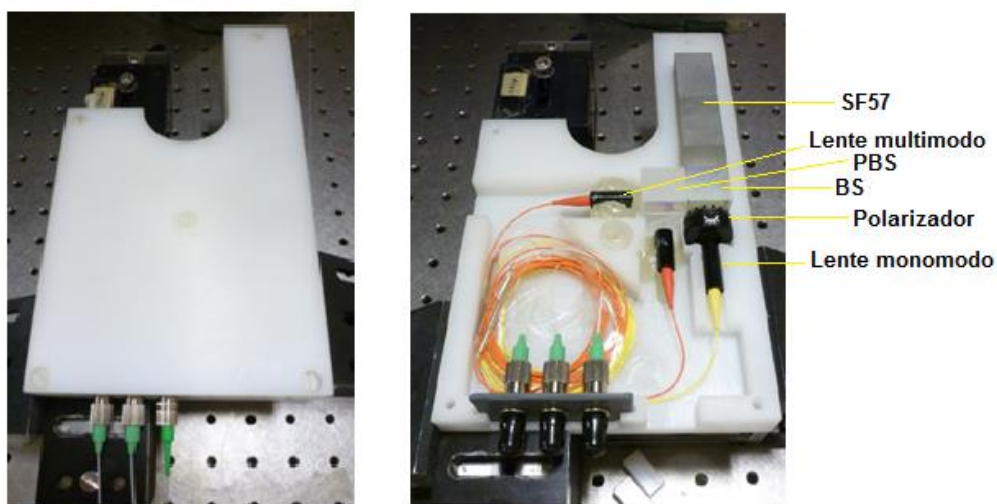
Na Figura 4.2 é mostrado o desenho final do encapsulamento feito no Autodesk Inventor, sendo o mesmo constituído por uma base inferior na qual assenta-se o sensor, uma base superior, uma placa com três orifícios onde se fixarão 3 conectores FC/APC, uma peça que prende o condutor elétrico ao sensor e por fim anéis que ficam entre o condutor e o suporte do sensor.

Neste esquema, temos uma entrada de fibra monomodo e duas saídas multimodo a 830 nm. Os anéis de cor azul são fabricados com o mesmo material do restante suporte e são importantes para ajustar o condutor ao sensor. Além disso, foi construído um conjunto de anéis de diferentes diâmetros internos, que era adequado para cada condutor com um dado diâmetro específico. Portanto, com estes foi possível utilizar o sensor com condutores que possuam um diâmetro máximo de 47 mm.



**Figura 4.2** - Encapsulamento do sensor em (a) e o prisma sensor em (b)

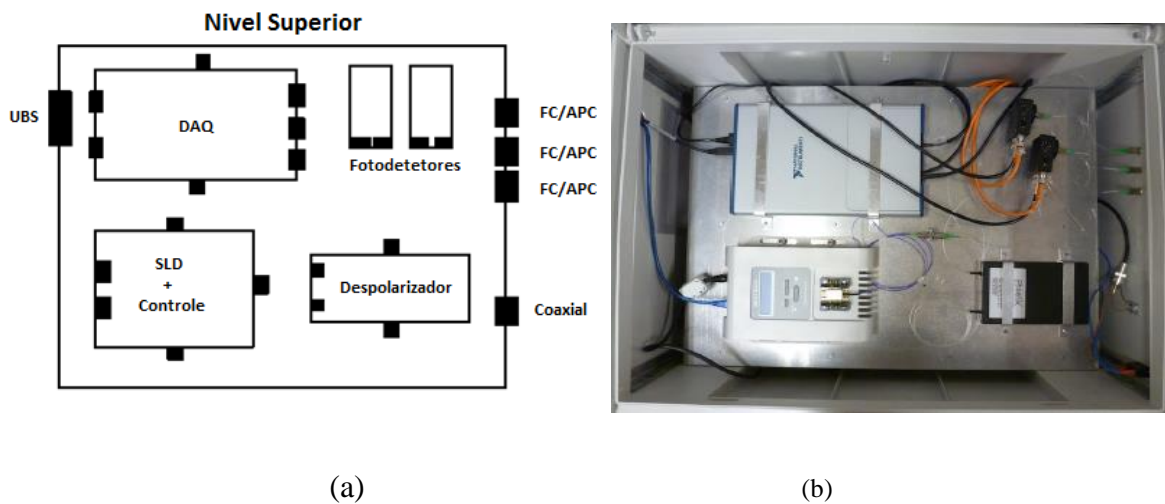
Na seqüência, os componentes do prisma sensor foram montados com a cola óptica epóxi EPO-TEK-301 [93], com 99% de transmitância em 830 nm, que "seca" dentro de 24h a 23°C permitindo pequenos ajustes de alinhamento durante o endurecimento. O mesmo epoxi foi usado para fixar componentes no prisma sensor para o encapsulamento. Além disso, a lente GRIN de entrada foi fixada no encapsulamento com cola de acrílato e a lente de saída com adesivo de fusão a quente após o alinhamento. Pequenos ajustes foram feitos na lente de saída durante a "secagem" do adesivo, a fim de manter o alinhamento. A disposição final do encapsulamento é mostrada na Figura 4.3 (a) e em (b) é ilustrado o interior do encapsulamento, mostrando o sensor e a lente GRIN responsáveis pela injeção e recolha da luz. Uma descrição mais detalhada do conjunto do sensor no gabinete é feita no Apêndice 2.



**Figura 4.3** – Encapsulamento do sensor (a) vista externa e (b) vista interna

### 4.3. Unidade de Interrogação

A escolha do sistema de interrogação também foi analisada de modo a tornar o sensor portátil. Uma caixa de PVC industrial com 65 cm, 50 cm e 25 cm de medidas foi usada como invólucro de proteção da optoeletrônica. Esta contém a fonte óptica SLD seguida por um despolarizador óptico necessário para reduzir o seu grau de polarização. Ele também contém o conjunto de detecção composto por dois fotodetectores Thorlabs PDA100A-EC e uma placa de aquisição NI DAQ USB-6363, como mostrado na Figura 4.4. A caixa tem dois níveis, um para a fonte de energia e transformadores de tensão e outra para os componentes ópticos e eletrônicos.



**Figura 4.4** - (a) Esquemático e (b) foto da unidade de interrogação no interior.

Todos os componentes ópticos são conectados, com a unidade que dispõe de uma entrada óptica e duas saídas ópticas, permitindo a ligação necessária entre o sistema e a cabeça de detecção (Figura 4.5 (a)). Há também uma porta de entrada elétrica com uma faixa de -12 a 12V que pode ser usada como entrada de referência ou para receber um sinal proporcional à corrente que passa no condutor, permitindo assim procedimentos de calibração. Na parte traseira, Figura 4.5 (b), o sistema também tem uma conexão USB, permitindo o controle através de um PC com o programa LabVIEW, onde todo o controle digital e processamento de sinal ocorre.

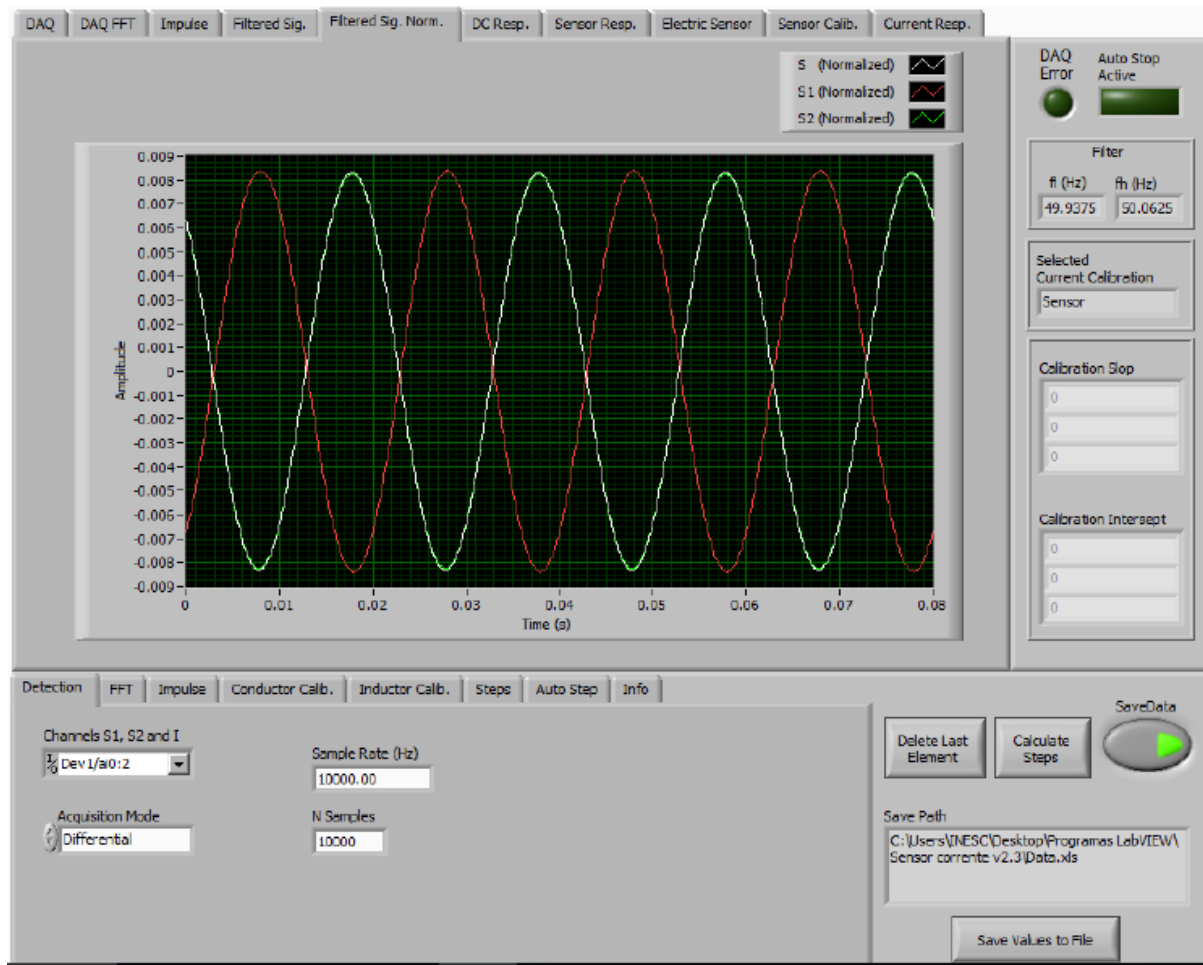


(a)

(b)

**Figura 4.5** - Sistema de aquisição vista de (a) frente e de (b) costa.

Na Figura 4.6 é apresentado o painel frontal do programa LabVIEW desenvolvido, utilizado para registrar e analisar o sensor de corrente óptica. O programa mostra os sinais de quadratura adquiridos na DAQ, os sinais depois de passar pelo filtro passa-banda (guia Filtrado Sig.) e a resposta AC como função do tempo da quadratura e sinais processados (guia Sensor Resp.). Os botões "Save Data" e "Save Values to File" são usados para gravar a resposta do sensor e exportar os dados gravados para um arquivo de texto, respectivamente.



**Figura 4.6** - Captura de tela do painel frontal do programa LabVIEW desenvolvido para a unidade de interrogação do sensor de corrente óptica.

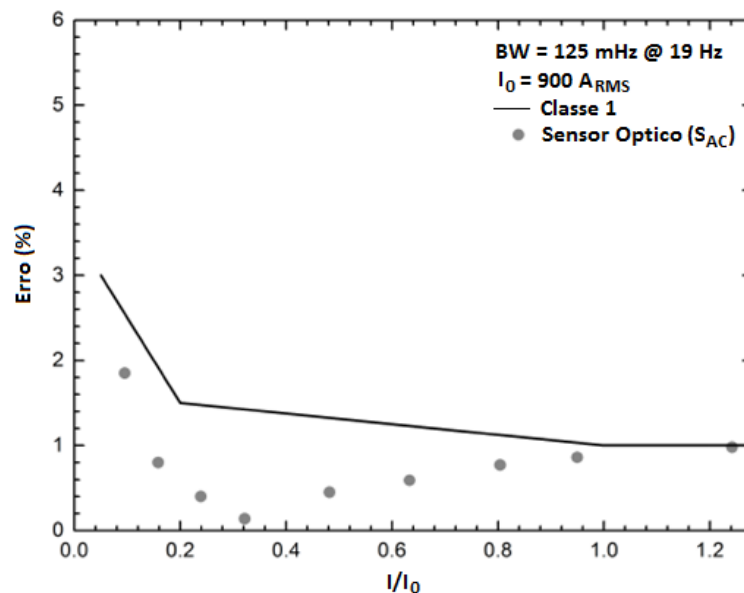
#### 4.4. Calibração do sensor

Depois do encapsulamento do sensor, o protótipo foi submetido a procedimentos de calibração e medições adicionais. Um indutor foi usado para aplicar um campo magnético senoidal estável com frequência de 19 Hz. No sistema de aquisição digital, foram definidas uma frequência de amostragem de 1 kHz e um filtro passa-banda com largura de banda de 125mHz.

Desta forma, o protótipo foi submetido a 12 procedimentos de calibração idênticos durante seis dias consecutivos. A sensibilidade média foi de  $1,2789 \pm 0,0070A^{-1}$ , com um erro de  $\pm 0,55\%$ , calculado como o desvio padrão dividido pela sensibilidade média. Este erro foi consequência de menores desalinhamentos dependentes da temperatura entre o sensor e a lente GRIN, ao executar o esquema de detecção polarimétrica em quadratura. Os erros de medição foram avaliados em uma faixa de corrente entre 0 e 1,2kA, com o sensor apresentando uma

resolução de  $0,455A_{RMS}$ . Os erros de precisão fornecidos pelo sensor óptico foram calculados de acordo com a Equação 2.5, como a diferença entre a resposta do sensor óptico (após a calibração) e a corrente equivalente, dividida pelo último parâmetro.

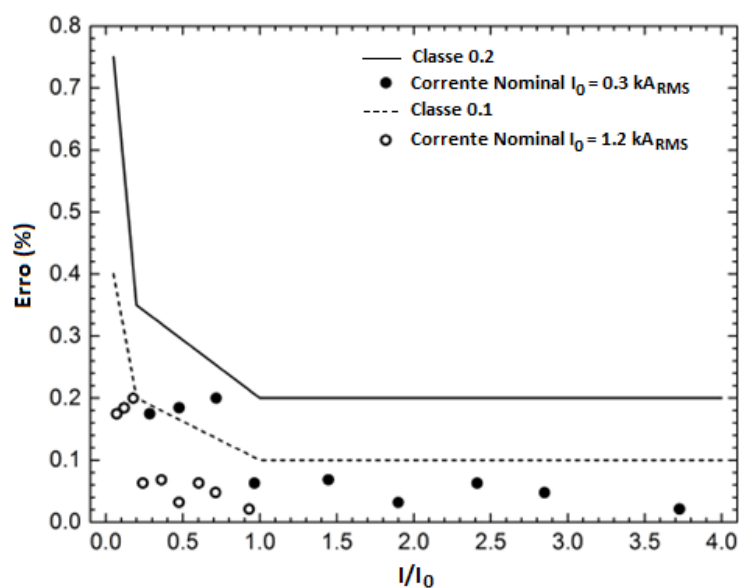
Na Figura 4.7 é mostrado o erro obtido para o protótipo e é comparado com a classificação de precisão industrial (normativa IEC 60044-1). O sensor satisfaz a operação de classe 1 com erro de  $\pm 1\%$  para uma corrente nominal de  $900 A_{RMS}$ . Devido a limitações experimentais, valores de corrente mais elevados não puderam ser testados. No entanto, considerando a faixa linear intrínseca do sensor, espera-se que a classe de precisão 1 seja válida para correntes mais elevadas.



**Figura 4.7** - Classificação de protótipos de acordo com classes de precisão de medição.

A precisão do sensor depende não só da sua precisão intrínseca, mas também da estabilidade da sua posição relativa ao condutor e da estabilidade da constante de Verdet, que é dependente da temperatura. Esses parâmetros podem ser otimizados e/ou contabilizados no processamento do sinal, contribuindo, em princípio, para otimizar ainda mais o desempenho do sensor.

De fato, considerando o erro de precisão intrínseco do sensor, considerando duas vezes o valor do desvio padrão ( $2\sigma$ ) dividido pela média, pode-se ver (Figura 4.8) que, potencialmente, o sensor pode caber classes de precisão 0,1 e 0,2 para correntes nominais de  $1,2 kA_{RMS}$  e  $0,3 kA_{RMS}$ , respectivamente.



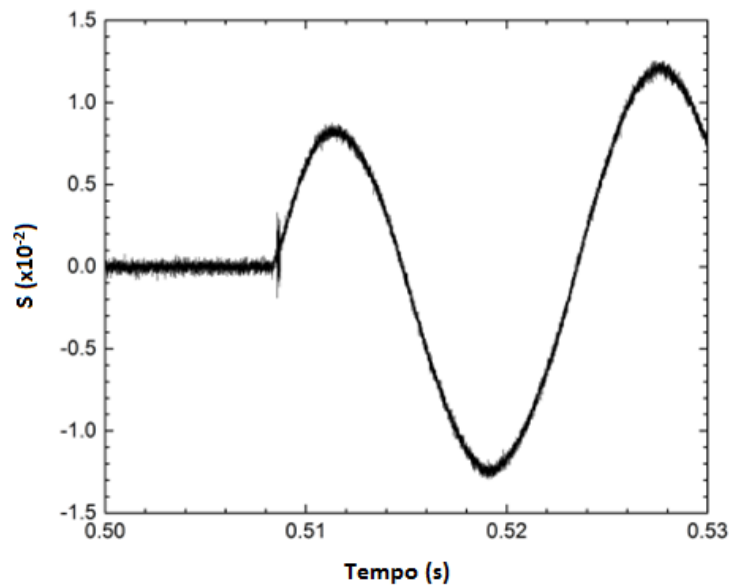
**Figura 4.8** - Erro de precisão do sensor nas classes de precisão de medição 0,2 e 0,1, considerando correntes nominais de 300 A<sub>RMS</sub> e 1200 A<sub>RMS</sub>.

#### 4.5. Detecção de transientes

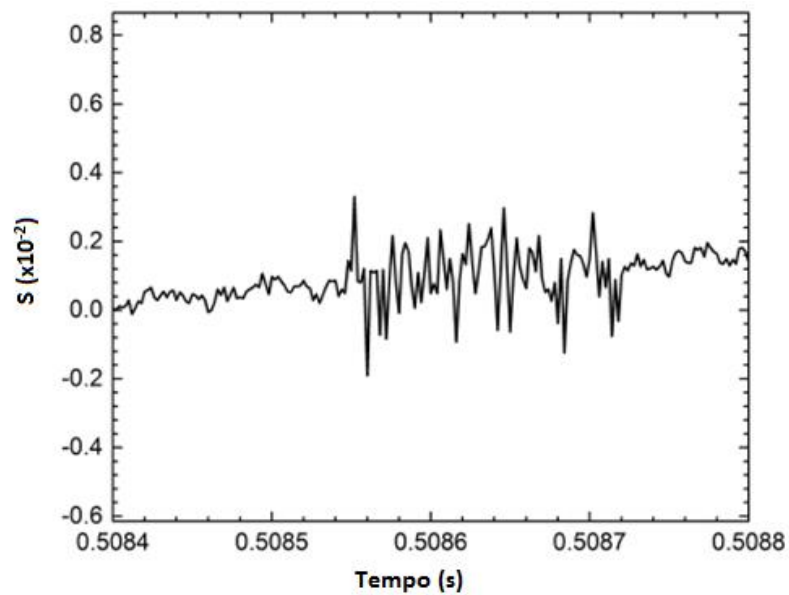
Alguns testes preliminares foram realizados, na Eletronorte, para avaliar a resposta do sensor aos picos de corrente transitória. Uma fonte de corrente industrial da Multi-amp foi manualmente ligada e desligada quando operava em aproximadamente 300A<sub>RMS</sub>. Durante este procedimento, foram observadas variações muito rápidas. Para estes testes, o ganho do detector foi reduzido, o que permitiu um aumento na largura de banda do sistema de detecção para 320 kHz.

A Figura 4.9 (a) representa o sinal do interruptor em operação, mostrando o primeiro ciclo do sinal de corrente. Na Figura 4.9 (b) pode-se observar um zoom dos sinais transitórios detectados durante a ativação.





(a)



(b)

**Figura 4.9** - (a) Sinal de saída do sensor ao ligar o condutor com 300 A<sub>RMS</sub> e em (b) um zoom dos pulsos de transientes detectados.

Uma variação (transiente) inicial também esteve presente devido ao deslizamento das barras de contato. Os resultados mostraram que o sensor foi capaz de detectar picos de variação (transientes) com  $3,62 \times 6,02 \mu\text{s}$  (tempo de subida em 90% de amplitude versus tempo de decaimento a 50% de amplitude). Estes dados indicam claramente a adequação do sensor para

uso em aplicações de proteção, em que é necessária uma rápida detecção de picos de variação (transitórios).

#### **4.6. Dependência da Temperatura**

A estabilidade do sensor como função da temperatura foi avaliada usando um forno durante a aplicação de um campo magnético externo constante. Na presente configuração, cada uma das partes do sistema (prismas e lente de acoplamento) estavam solidárias com o invólucro de nylon, permitindo a caracterização de vários ângulos e distâncias de acoplamento. Infelizmente, nesta configuração, a expansão térmica do invólucro levou a um desalinhamento provocado pela temperatura induzida o que resultou na degradação da eficiência de acoplamento e a relação sinal/ruído diminuiu.

No entanto, o processamento de sinal foi capaz de compensar a maior parte da perda de potência. Contudo, para mudanças de temperaturas superiores a aproximadamente 20°C, a perda de energia era elevada, o que comprometia a operação do sensor. Portanto, a gama de funcionamento do sensor foi de 25°C ± 15°C. Apesar disto ser inaceitável para a maioria das aplicações práticas, isto foi adequado para caracterizar e validar o protótipo. Além disso, esta situação pode ser facilmente melhorada usando a aplicação de uma solução monolítica, onde os prismas de sensoriamento podem ser colados juntos à lente GRIN de forma permanente usando uma cola óptica adequada, como por exemplo, Epoxy EPO-TEK 301 que pode suportar temperaturas de até 430 °C.

Com esta abordagem, as propriedades intrínsecas dos sensores permitem uma operação estável ao longo de um intervalo de temperatura maior. No entanto, a dependência da temperatura com a constante de Verdet deve ser considerada para evitar flutuações da função de calibração do sensor. Além disso, como a dependência da constante de Verdet com a temperatura é linear [19,94], ela pode ser facilmente compensada pela inclusão de um sensor de temperatura no interior do invólucro (uma fibra com grade de Bragg, por exemplo) e com a utilização de uma matriz de calibração adequada. Portanto, este efeito, também, pode ser corrigido variando o estado de polarização da luz de entrada em função da temperatura. Isto pode ser conseguido usando uma placa de onda com uma precisa defasagem linear [46].

# Sensor de corrente a fibra

Neste capítulo é feito um breve resumo dos principais requisitos para a utilização de uma fibra como sensor de corrente. Além disso serão mostradas as vantagens de se utilizar fibras de cristais fotônico (PCF – *Photonic Crystal Fibers*) no sensoriamento de corrente, bem como o tipo que será usada no sensor. A última parte do capítulo, será dedicada aos resultados experimentais e às análises numéricas obtidas com o sensor baseado em PCF.

## 5.1. Requisitos da fibra óptica para utilização como sensor de corrente elétrica.

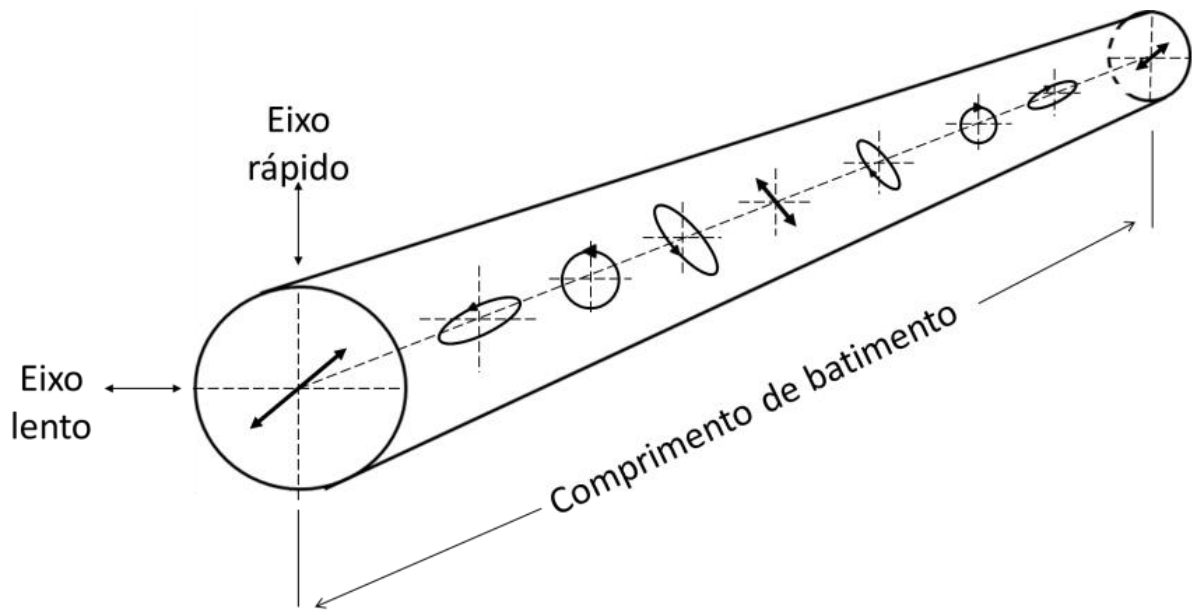
Uma vez que as medidas polarimétricas são mais estáveis, este método de leitura foi utilizado. Assim, se faz necessário ter em mente como ocorre a evolução do estado de polarização da luz no interior de uma fibra óptica.

Para as fibras ópticas tradicionais, aquelas sem padrão de buracos, a seção transversal é praticamente simétrica. Como o grau de simetria é elevado, o modo fundamental da luz que viaja pelo núcleo é degenerado, ou seja, o índice de refração que as componentes de polarização ortogonais “enxergam” é o mesmo. Desta forma, o acoplamento da luz entre essas duas polarizações é extremamente fácil, e numa situação onde queremos medir a polarização da luz na saída da fibra, tal efeito é indesejado. Em termos de birrefringência, como os índices de refração dos modos x e y (considerando luz polarizada no plano x e y) são muito parecidos, logo, a birrefringência linear ( $n_x - n_y$ ) é baixa.

Para diminuir o acoplamento entre os modos ortogonais de polarização é necessário, então, aumentar a birrefringência linear da fibra. O termo aumentar, aqui é utilizado, porque devido a imperfeições no processo de fabricação, as fibras sempre possuem uma pequena birrefringência linear intrínseca. Em termos práticos, inserir birrefringência linear significa dizer que é necessário quebrar a simetria circular do núcleo.

No caso de fibras tradicionais pode-se atingir esse objetivo fabricando uma fibra com núcleo elíptico [46]. Já nas fibras ópticas de cristal fotônico (PCF) pode-se modificar o padrão de buracos de modo a comprimir mais fortemente o núcleo numa das duas direções ortogonais  $x$  ou  $y$  [95]. Assim, quanto maior a compressão, maior a birrefringência linear e, conseqüentemente, menor o acoplamento entre os modos.

No entanto, a presença da birrefringência linear, apesar de necessária, também é indesejada, como será visto nos próximos parágrafos. Se pensarmos na evolução do estado de polarização da luz dentro da fibra, o atraso de fase entre as duas polarizações ortogonais determina o modo como a luz sai polarizada. Esse atraso depende não só do índice de refração, mas do comprimento da fibra. A Figura 5.1 apresenta a evolução do estado de polarização dentro da fibra para uma luz linearmente polarizada.



**Figura 5.1** - Evolução do estado de polarização da luz no interior de uma fibra óptica. O comprimento de batimento é o comprimento necessário para que a polarização retorne ao estado inicial.

O comprimento de batimento é o comprimento necessário para que a polarização retorne ao seu estado inicial e está relacionado com a birrefringência linear pela equação:

$$L_P = \frac{2\pi}{\Delta\beta} \quad (5.1)$$

sendo  $\Delta\beta$  a birrefringência linear. Assim, apenas em valores múltiplos do comprimento de batimento o estado de polarização de saída será o mesmo da entrada. Além disso, dependendo

do comprimento da fibra, a luz pode, na saída, apresentar qualquer estado de polarização: linear, elíptico ou circular.

Por questões práticas, não é desejável, não queremos que o estado de polarização da luz se modifique por causa da fibra, mas somente por causa do parâmetro a ser sensoriado. Para suplantar esse problema é preciso inserir algo cujo efeito seja dominante sobre o efeito da birrefringência linear. A ideia é quebrar a simetria longitudinal da fibra e, para isso, acrescentamos a chamada birrefringência circular [54].

Enquanto a birrefringência linear produz dois modos de polarização linear, a birrefringência circular produz modos de polarização circular direita e esquerda. Qualquer diferença de fase entre estes dois modos tem o efeito de rodar o plano de polarização. Assim, luz linearmente polarizada propagada através desta fibra vai, então, permanecer polarizada linearmente no final da fibra, mas com um plano de polarização rotacionado.

Para utilizar a fibra como sensor, este pode ser implementado com uma única fibra óptica enrolada em torno do condutor tornando-o imune a campos magnéticos externos, conforme descrito na seção 2.2.2. Além disso, a sensibilidade do sensor, geralmente, pode ser aumentada com o número de voltas. No entanto, o grande número de voltas na fibra torna o sensor mais vulnerável a perturbações ambientais, tais como pressão, temperatura e vibrações mecânicas [54], levando a medições imprecisas tanto na configuração polarimétrica, quanto na interferométrica.

As imperfeições na fibra, nomeadamente geometria, tensões residuais, curvatura e pressão, ocasionadas durante o processo de fabricação da fibra também contribuem para o aumento da birrefringência linear, e, portanto, o comprometimento da resposta do sensor. Com o objetivo de atenuar tais efeitos indesejáveis, foram propostas o uso de vários tipos de fibra, tais como as fibras de baixa birrefringência (LoBi) e as fibras torcidas (que podem ser de LoBi ou HiBi) [96]. Deste grupo de fibras propostos, a fibra torcida de HiBi mostrou-se melhor porque é quase independente da birrefringência adicional produzida por flexão ou vibração [57,96].

Tipicamente, nestas fibras a birrefringência é fortemente dependente da temperatura, porque usa-se pelo menos dois materiais de vidro diferentes com coeficiente de expansão térmica diferentes, por isso, para superar este problema, as fibras PCF HiBi são necessárias

[97,98]. Também, fibras PCF tem vantagens de ser mais robustas e fornecem a possibilidade de operação em um único modo em múltiplos comprimentos de onda [99].

## 5.2. Amostras de fibra

As amostras de fibras foram fornecidas pelo grupo do Laboratório de Fibras Especiais e Materiais Fotônicos – LaFE do Instituto de Física da Universidade de Campinas. De forma resumida, os requisitos da fibra óptica para esse sensor são (1) birrefringência linear moderada para diminuir o acoplamento entre as polarizações ortogonais do modo fundamental e (2) alta taxa de rotação para que a birrefringência circular seja dominante sobre a birrefringência linear.

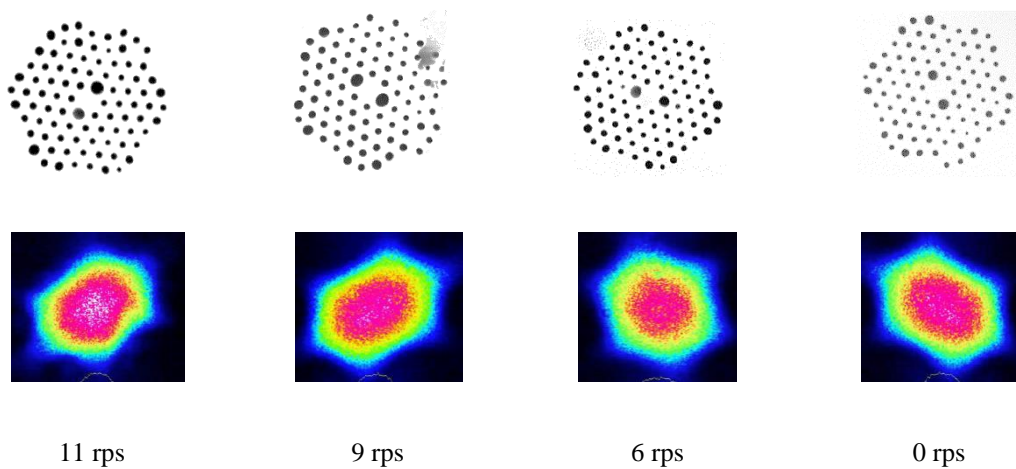
A equipe do LaFE realizou o processo de fabricação da fibra em três etapas: simulação de estruturas para análise de birrefringência linear, fabricação da estrutura da fibra e rotação da estrutura para inserção de birrefringência circular. A simulação foi feita utilizando o método de elementos finitos com o *software* comercial Comsol.

Na etapa de fabricação, a preforma da fibra de cristal fotônico é fabricada pelo processo de empilhamento e puxamento. A fibra é composta de cinco anéis periódicos de buracos de ar em torno de um núcleo central sólido de 2,6  $\mu\text{m}$  de diâmetro. Os buracos de ar têm o mesmo diâmetro, exceto para dois buracos maiores na vizinhança do núcleo que têm 3,9  $\mu\text{m}$  (Figura 5.2). O parâmetro de rede (diâmetro dos buracos dividido pela sua distância centro-a-centro,  $d/\text{período}$ ) é de aproximadamente 0,6 e foi escolhida para assegurar que a fibra fosse monomodo em 633 nm. A pressão interna usada para controlar o diâmetro dos buracos de ar e a proporção de período foi de cerca de 100 mbar. A fibra tem aproximadamente 127  $\mu\text{m}$  de diâmetro. As fibras torcidas foram produzidas através da rotação da preforma microestruturada durante o estiramento no processo de fabricação da fibra óptica.

As taxas de rotação produzidas eram 6, 9 e 11 rps (rotações por segundo) e velocidade de estiramento (é a quantidade de fibra por minuto que o sistema consegue fornecer) em torno de 7,3 m/ min dado um período circular ( $L_T$ ) de 20,28, 13,52 e 11,06 mm, respectivamente. Vale mencionar que o período circular está relacionado a velocidade de estiramento ( $L_T = v \cdot T$ , aqui  $v$  é dado em mm/s e  $T$  é o período de rotação utilizado). Estes parâmetros geraram fibras com uma birrefringência circular de 309,9, 464,8 e 568,1 rad/m, respectivamente. A birrefringência linear foi determinada pelo método de escaneamento de comprimento de onda usando uma fibra PCF não torcida (0 rps) dando o valor de  $4,1 \times 10^{-5}$ . O comprimento de

batimento linear ( $L_P$ ) foi estimado, através de simulações, em 25,32 mm (248,15 rad/m) a 633 nm.

Para as fibras com rotação não foi determinada a birrefringência linear porque o método de escaneamento de comprimento de onda não se aplica a eixos de birrefringência que rodam ao longo do eixo de propagação. Dessa forma, foi usada a hipótese de que a birrefringência linear para as fibras com rotação é a mesma da sua equivalente sem rotação. Na Figura 5.2 é mostrada a seção reta de cada fibra fabricada e o perfil do modo correspondente a 633 nm.

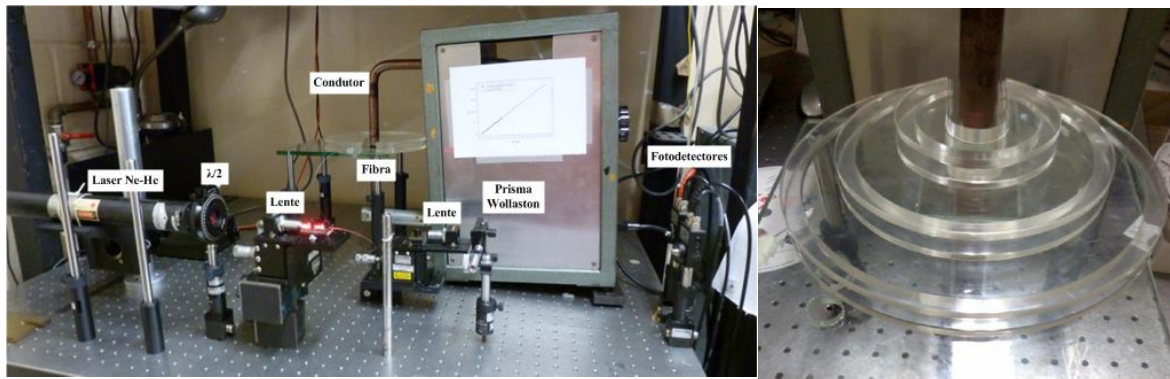


**Figura 5.2** – Seção transversal para cada fibra PCF e correspondente perfil do modo a 633 nm [Fonte: LaFE-UNICAMP].

Na referência [96] é possível encontrar uma descrição detalhada de todo o processo de fabricação, bem como a análise dos principais parâmetros da fibra. Portanto, nas próximas seções, serão mostradas três fibras PCF HiBi torcidas e suas caracterizações como um sensor de corrente em uma configuração polarimétrica usando diferentes diâmetros de enrolamento.

### 5.3. Caracterização do sensor em fibra

Na Figura 5.3 (a) é mostrada uma fotografia dos primeiros estágios da montagem experimental no laboratório com a PCF HiBi operando a 633nm e com a fonte de corrente usada para gerar o campo magnético e na Figura 5.3 (b) são mostrados os 3 suportes de 6, 12 e 18 cm de diâmetros, onde as fibras foram enroladas em volta do condutor.

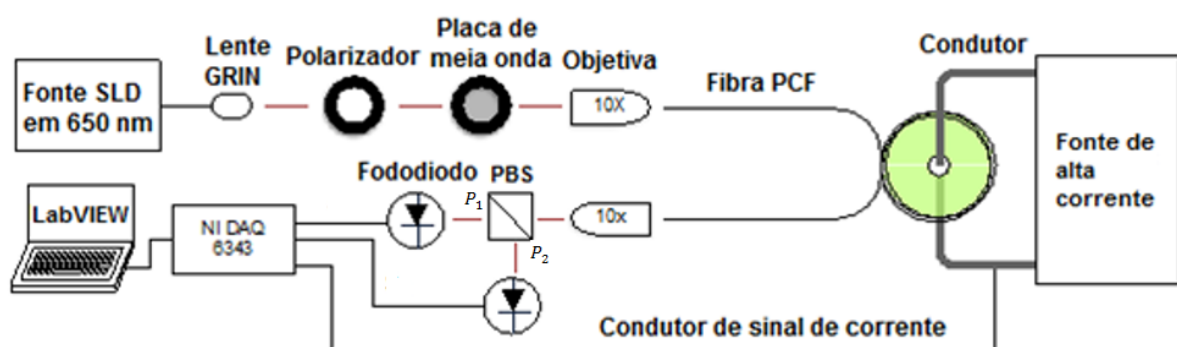


(a)

(b)

**Figura 5.3** – Fotografia da montagem experimental em (a) e dos suportes para enrolar a fibra em (b)

Na Figura 5.4 é mostrada a configuração para caracterizar as fibras desenvolvidas para medição de corrente. Neste setup, foi utilizada luz de uma fonte SLD de 650 nm, um polarizador seguido por uma placa de meia onda ( $\lambda/2$ ) utilizados para controle de polarização. Em seguida foi injetada luz na PCF HiBi, através de uma objetiva. Quando a luz passa dentro da fibra enrolada no condutor sofre o efeito Faraday, e por consequência sua polarização é rotacionada. No final do percurso a luz é colimada e as duas polarizações ortogonais são separadas através de um divisor de polarização e detectadas por fotodiodos. Um programa no LabVIEW foi desenvolvido para adquirir e processar as duas polarizações com um NI DAQ 6343 (resolução de 1.92mV) e gravar o sinal de referência da corrente que passa pelo condutor.



**Figura 5.4** – Sensor de corrente elétrica

Como foi dito na seção 1.4.5, a maior incidência de feixes de luz é obtida quando os polarizadores de saída estão a  $\pm 45$  graus em relação à entrada e dessa forma o sinal de saída do sensor de quadratura obedece a Equação.



$$S = \frac{P_1 - P_2}{P_1 + P_2} = 2\theta_f \quad (5.2)$$

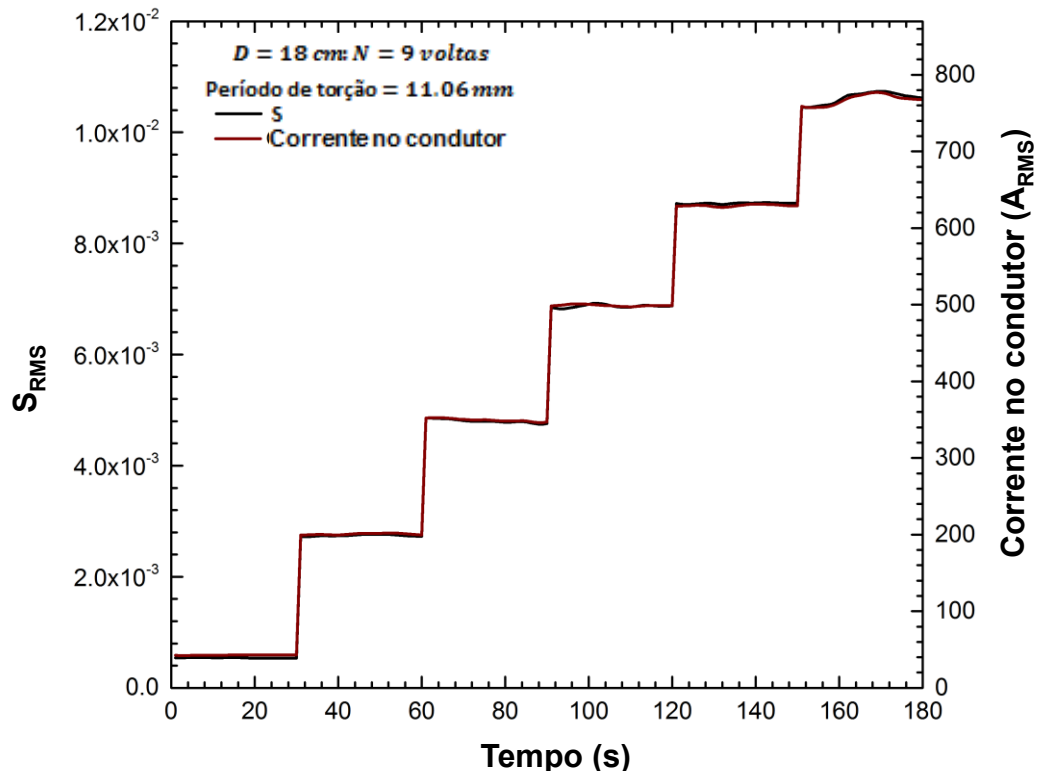
Como consequência desta Equação 5.2, o sistema torna-se independente de variações de potência óptica. Para um número completo de  $N$  voltas a rotação de Faraday é.

$$\theta_f = \mu \cdot V \cdot N \cdot I \quad (5.3)$$

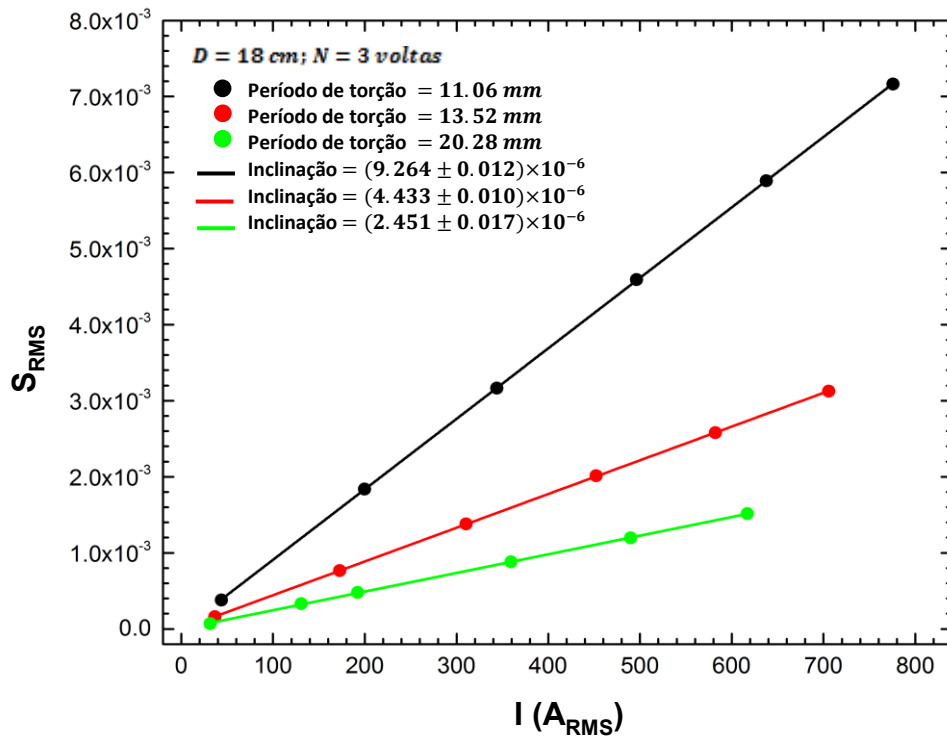
em que  $\mu$  é a permeabilidade relativa do meio no interior ao enrolamento,  $V$  é a constante de Verdet em rad/(T.m) e  $I$  é corrente que passa no condutor.

#### 5.4. Resultados e discussão

Usando as quatro fibras descritas, foram feitos testes com 3 diferentes diâmetros de enrolamento. Na Figura 5.5 (a) é apresentado um teste onde a passagem de corrente no condutor foi incrementada em passos de 30s. Para cada passo, a média e o desvio padrão foram calculados para obter uma curva de calibração. Na Figura 5.5 (b), é mostrado as curvas de calibração obtidas para as fibras torcidas com períodos de torções 11,06 mm, 13,52 mm e 20,28 mm, com três voltas da fibra ao redor do condutor. Também, foi observado uma boa linearidade da resposta do sensor em relação à corrente elétrica para as três fibras torcidas. Como esperado, a fibra não-torcida também foi testada, mas nenhum resultado foi alcançado devido a sua elevada birrefringência linear em relação à pequena birrefringência circular.



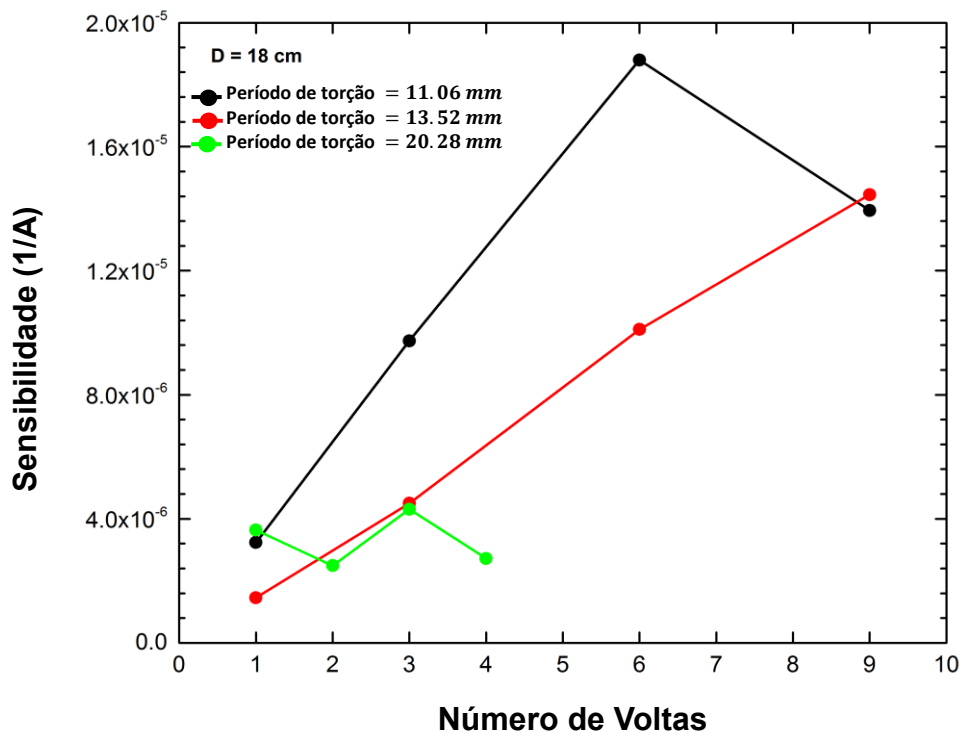
(a)



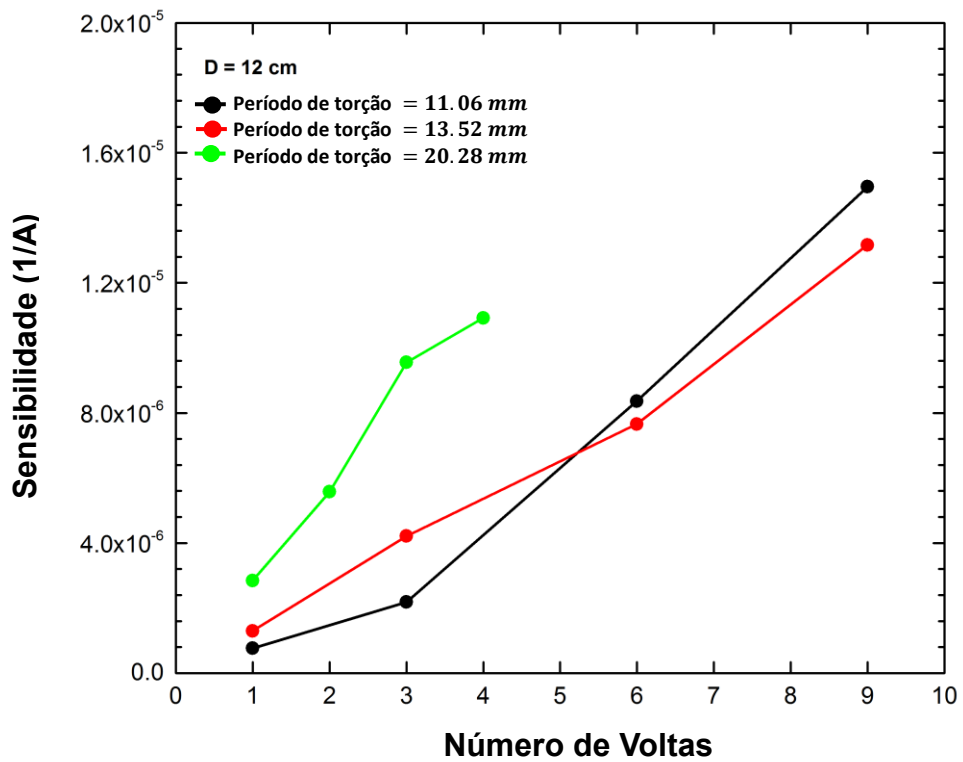
(b)

**Figura 5.5 -** (a) Resposta do sensor para diferentes incrementos na corrente aplicada e (b) calibração para a fibra PCF com diferentes torções.

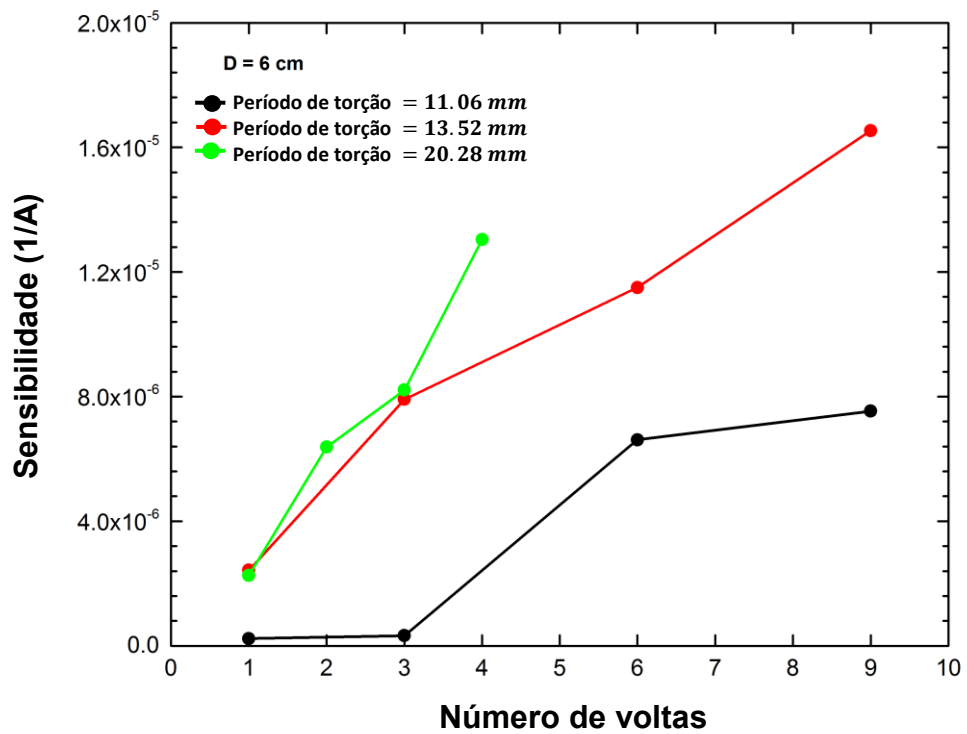
Na Figura 5.6 é mostrada os gráficos obtidos para diferentes diâmetros do suporte, fibras e número de voltas em torno do condutor. É observado na Figura 5.6 (a), enrolamento de 18 cm diâmetro, que a fibra com baixo período de torção circular proporciona melhores resultados até 6 voltas, seguidas por aquelas com 13,52 e 20,28 mm de períodos de torção circular (i.e, em quantos metros temos uma volta de  $2\pi$  da fibra), respectivamente. Devido às limitações no comprimento da fibra com período de torção de 20,28 mm, não foi possível dar mais que 4 voltas ao redor do condutor. Com um enrolamento de 12 cm de diâmetro, Figura 5.6 (b), a fibra com 11,06 e 13,52 mm período de torção circular deu resultados semelhantes. No último caso, Figura 5.6 (c), com um enrolamento de 6 cm de diâmetro a fibra com maior período de torção circular apresentou melhores resultados.



(a)



(b)



(c)

**Figura 5.6** – Sensibilidade do sensor em função do número de voltas ao redor do condutor de diâmetros (a) 18cm, (b) 12 cm e (c) 6 cm.

Os resultados mostraram que a sensibilidade varia drasticamente em função do número de voltas. Podemos observar também que para diâmetro grande da bobina a fibra com menor período de torção circular é preferível e para pequenos diâmetros uma PCF HiBi com período de torção circular maior (inferior birrefringência circular) é preferível, contribuindo para melhor sensibilidade. Além disso, esperava-se uma diminuição da sensibilidade quando se reduzia o diâmetro de enrolamento, contudo este fato foi apenas verificado para a fibra de 11,06 mm. Embora esta fibra fosse destinada a proporcionar imunidade à birrefringência linear induzida, como mostrado na Ref. [95] deve ter-se em conta que quando operada em transmissão funciona contra este objetivo, como foi demonstrado, pelo autor, usando uma fibra IVG.

### 5.5. Análise Numérica

Foi feita uma comparação a partir das equações encontradas na literatura com os resultados experimentais obtidos a partir do setup mostrado na Figura 5.4, realizado nos laboratórios do INESC TEC.

A sensibilidade máxima normalizada em relação a corrente aplicada,  $m_{MAX}$  (normalizada para a sensibilidade de uma fibra ideal circularmente birrefringente) é dada por [54]:

$$m_{MAX} = \frac{4L_P^2/L_T^2}{1+4L_P^2/L_T^2} \quad (5.4)$$

onde  $m$  é um fator entre 0 e 1 e  $L_T$  é o período circular e  $L_P$  é o comprimento de batimento linear de uma fibra não torcida. O comprimento de batimento de polarização elíptica dado por [54]:

$$L'_P = \frac{L_P \cdot L_T}{\sqrt{(4L_P^2 + L_T^2) - 2L_P}} \quad (5.5)$$

De posse destes valores, foi possível observar, através de modelagens, o comportamento esperado da sensibilidade para cada fibra utilizada. Reescrevendo a Equação 5.4, temos [54]:

$$m_{MAX} = \frac{4}{\left(\frac{L_T}{L_P}\right)^2 + 4} \quad (5.6)$$

Na Tabela 5.1, são dadas as características das fibras utilizadas e as expressões para obtenção de cada parâmetro. Assim, obteremos a curva de todos os valores esperados em função de  $L_T/L_P$ .

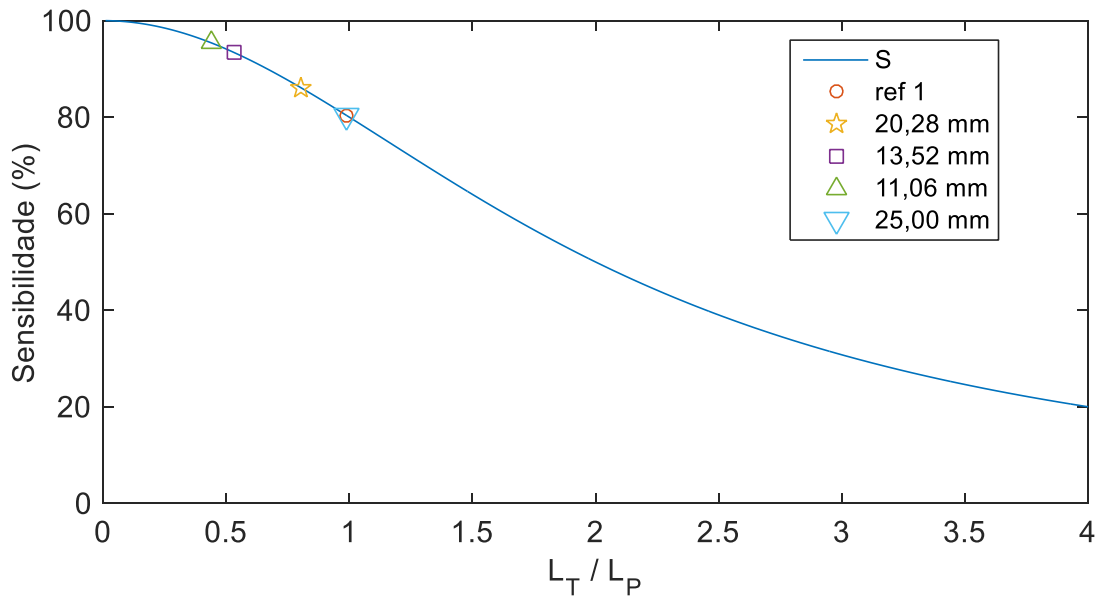
**Tabela 5.1** - Valores característicos das fibras, onde  $\Delta\beta$  é a birrefringência linear e  $\xi$  a birrefringência circular.

		4,5 rps	6 rps	9 rps	11 rps
$L_P$	$L_P = \frac{2\pi}{\Delta\beta}$	25,32 mm			
$L_T$	$L_T = \frac{2\pi}{\xi}$	25,00 mm	20,28 mm	13,52 mm	11,06 mm
$L'_P$	$L'_P = \frac{L_P \cdot L_T}{\sqrt{(4L_P^2 + L_T^2)} - 2L_P}$	0,1085 mm	0,1313 mm	0,1930 mm	0,2346 mm

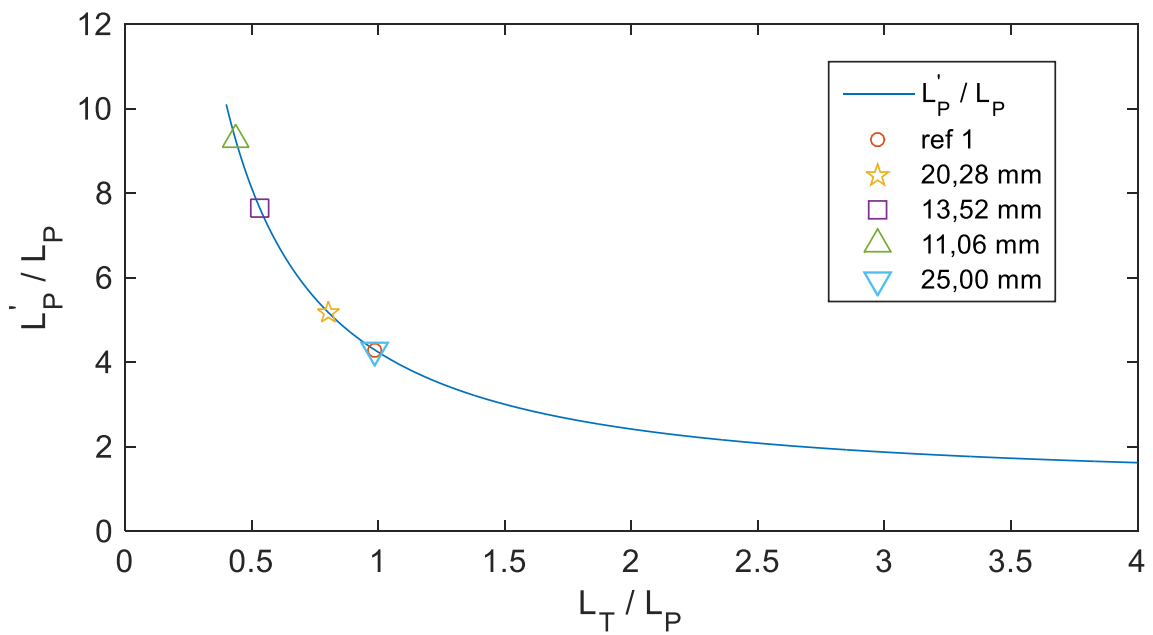
### 5.5.1. Sensibilidade relativa

A sensibilidade relativa normalizada e o comprimento de batimento de polarização elíptico normalizado das fibras ( $L'_P$ ) são mostrados nas Figuras 5.7 (a) e 5.7 (b) em função da razão entre  $\frac{L_T}{L_P}$ , respectivamente. Para tornar a fibra insensível aos efeitos de acabamentos externos, é exigido que o comprimento de batimento elíptico  $L'_P$  seja o mais curto possível. Da Figura 5.7 (b), observa-se que isso é obtido escolhendo uma pré-forma inicial com um pequeno  $L_P$  e selecionando uma grande razão entre  $L_T$  e  $L_P$ . Entretanto, esta razão não pode ser aumentada indefinidamente, uma vez que o efeito é uma grande diminuição na sensibilidade relativa da corrente na fibra (Figura 5.7 (a)).

O decréscimo na sensibilidade ocorre porque a elipticidade dos modos da fibra se tornam maior, aproximando-a de uma fibra de alta birrefringência linear (ou seja, com modos linearmente polarizados) [54]. É bem conhecido que tal fibra tem uma resposta muito pequena à corrente. É necessário, portanto, escolher um compromisso entre os dois parâmetros de modo a obter um  $L'_P$  pequeno, sem reduzir seriamente a sensibilidade. Uma fibra otimizada pode ter um período de rotação aproximadamente igual ao comprimento de batimento linear não torcido, sendo, portanto, uma birrefringência quasicircular com  $L'_P = 4,2L_P$ , tendo a sensibilidade relativa de corrente em torno de 80% (ver pontos marcados na Figura 5.7 (a) e 5.7 (b) para 25 mm / 4,5 rps).



(a)



(b)

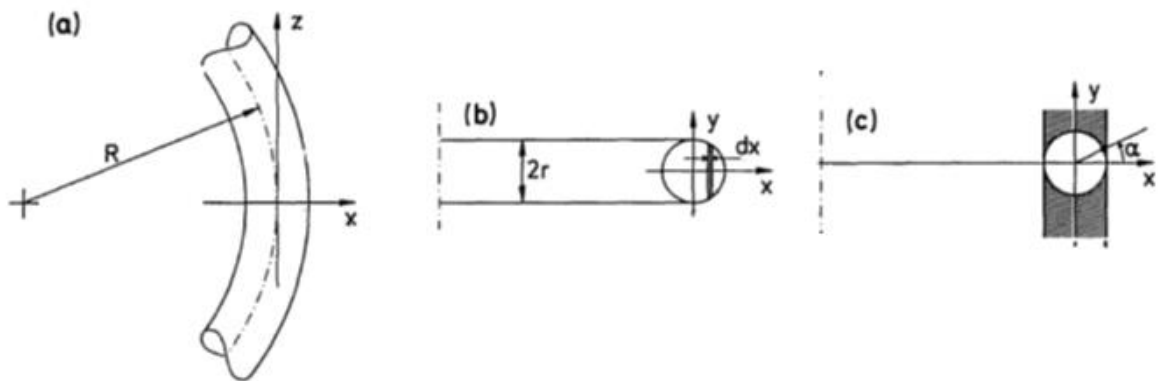
**Figura 5.7** – (a) Sensibilidade normalizada em função da razão entre o período circular ( $L_T$ ) e o comprimento de batimento linear ( $L_P$ ). (b) Comprimento de batimento elíptico normalizado em função da razão entre o período circular ( $L_T$ ) e o comprimento de batimento linear ( $L_P$ ).

Ainda, analisando a Figura 5.7 (b) é observado como a sensibilidade da fibra é alterada em função do período circular ( $L_T$ ). Como esperada pela análise da Equação 5.4, ao

aumentarmos o número de rotações da fibra, a razão  $L_T/L_P$  tende a zero, e a sensibilidade tende a 100%. Por esta lógica, é possível aumentar o número de rotações tanto quanto for necessário ou produzir fibras com birrefringência linear tão baixa quanto necessário para que  $m$  tenha valores mais próximos de 100%. Com relação ao resultado do artigo [54], podemos ver que ele coincide com uma de nossas fibras, a de 4,5 rps onde possuem uma sensibilidade de aproximadamente 80% (0,8). No entanto, todas as outras fibras, de 20,28 mm, 13,52 mm e 11,06 mm (6, 9 e 11 rps, respectivamente), apresentam maior sensibilidade.

### 5.5.2. Enrolamento e Curvatura

A birrefringência induzida é essencialmente um efeito de estresse causado pela curvatura da fibra. A Figura 5.8 mostra uma fibra sendo dobrada [100]. A lateral da fibra interior à circunferência imaginária formada pela dobra sofre uma força de compressão, e a lateral externa sofre uma força de tensão. Estas forças são observadas na componente  $z$  e não influenciam diretamente na birrefringência. Mas, se observarmos a componente  $x$ , veremos que nos dois lados a fibra sofre um estresse de compressão, o que altera a geometria da fibra e conseqüentemente induz uma birrefringência [57,100].



**Figura 5.8** – Geometria de uma fibra dobrada [100].

Até o presente momento não foi levado em consideração o efeito da birrefringência induzida causada pelo enrolamento das fibras nos diferentes suportes. Iremos entender agora de que forma o comprimento de batimento linear devido ao enrolamento ( $L_{ind}$ ) influencia na sensibilidade. A birrefringência linear induzida pelo enrolamento é dada por  $\delta = 2\pi/L_{ind}$  [100], sendo que  $L_{ind}$  é dado por [100].

$$L_{ind} = 7,4 \cdot \lambda \frac{D^2}{d^2} \quad (5.8)$$



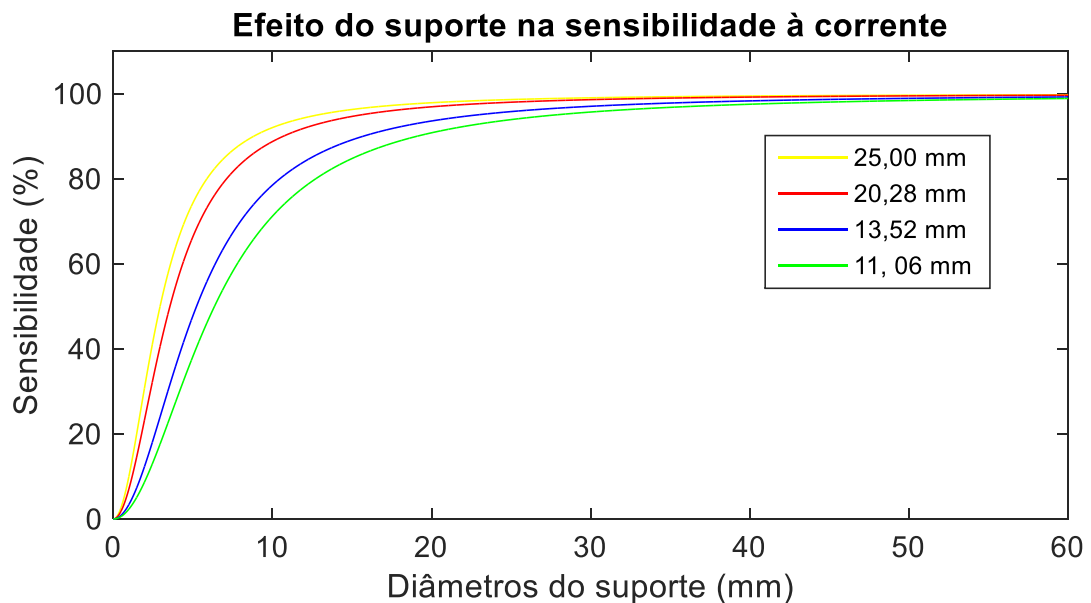
onde  $D$  e  $d$  os diâmetros do suporte e da fibra, respectivamente. Segundo [100], a sensibilidade da fibra em função de  $L_{ind}$  e  $L'_p$  é dada por:

$$m_{ind} = \frac{L_{ind}^2/L'_p{}^2}{1+L_{ind}^2/L'_p{}^2} \quad (5.9)$$

Usando  $m_{ind}$  em função de  $L'_p/L_{ind}$ , a sensibilidade fica:

$$m_{ind} = \frac{1}{1+L'_p{}^2/L_{ind}^2} \quad (5.10)$$

Na Figura 5.9, é mostrado o gráfico da sensibilidade normalizada induzida em função diâmetro do suporte ( $D$ ).



**Figura 5.9** – Sensibilidade normalizada em função do diâmetro do suporte

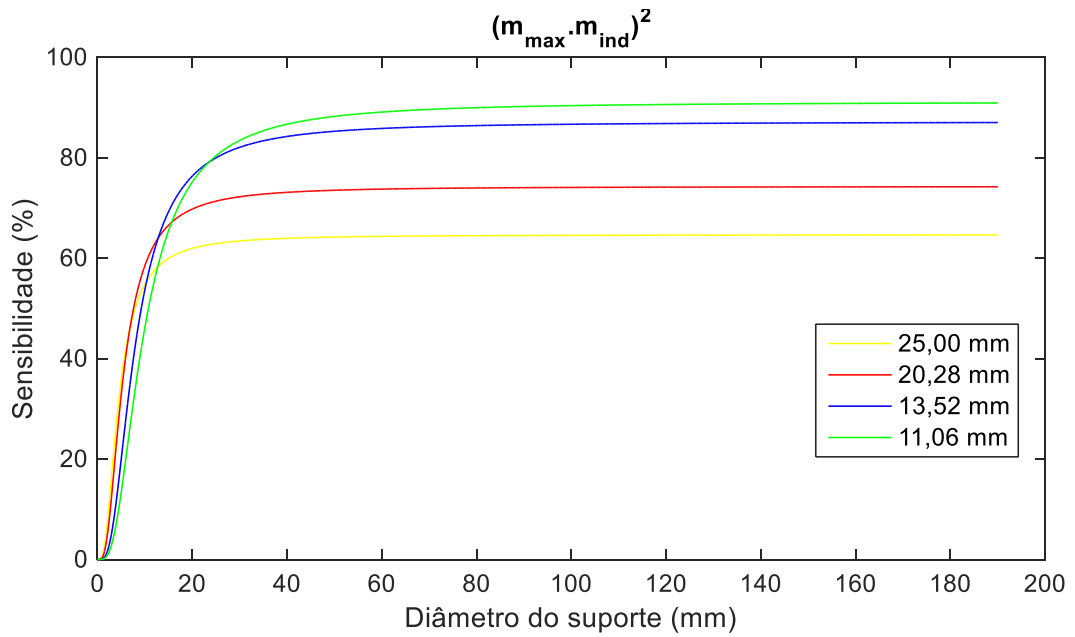
É observado que quanto maior o diâmetro do suporte, maior a sensibilidade para todas as fibras. Para entender fisicamente, deve-se ter em mente que quanto menor o diâmetro do suporte, mais a fibra será dobrada e mais compressão a fibra irá sofrer, criando uma birrefringência linear indesejada na fibra. Do contrário, se utilizado um suporte suficientemente grande, os resultados teriam maior aproveitamento de sensibilidade. Observando, por outro lado, o número de rotações da fibra, é notado que a de menor rotação (maior período de torção) sofre menos com o dobramento da fibra. Para uma maior rotação na fibra (menor período de torção), o suporte deve ser suficientemente grande para compensar a queda de sensibilidade.

### 5.5.3. Sensibilidade Total

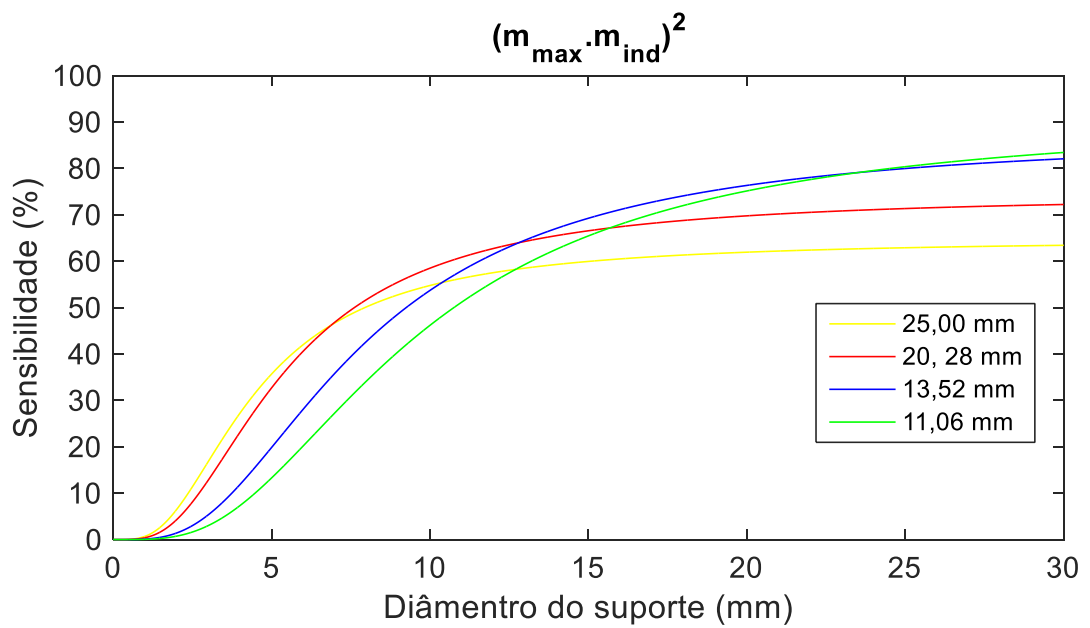
De acordo com a literatura, nas fibras birrefringentes lineares e circulares utilizadas em sensores de corrente, a sensibilidade máxima diminui em relação a uma fibra ideal sem birrefringência (Equação 5.3), pelos fatores  $m_{MAX}m_{ind}$ . No entanto, este fator só é válido se a radiação for quasimonocromática, tal como fornecida por uma fonte de luz laser monomodo. Para uma fonte óptica de banda larga, a sensibilidade teórica é dada em vez disso por  $(m_{MAX}m_{ind})^2$  [54].

Neste caso, esta análise será feita com base no produto  $m_{MAX}^2 \cdot m_{ind}^2$ . Na Figura 5.10 é mostrada a sensibilidade total normalizada da fibra para os diferentes valores de diâmetro do suporte.

Como esperado, as fibras de maior rps convergem para um valor maior de sensibilidade, embora a birrefringência induzida cause o efeito contrário. De 0 a 20 cm, temos uma área onde as fibras de menor rps sobem mais rapidamente e ainda se mantêm com sensibilidade maior, como pode ser visto na Figura 5.10 (b). Conforme o diâmetro do suporte aumenta, os valores se invertem e nota-se uma diferença nas sensibilidades de cada fibra, de forma que o efeito da birrefringência circular passa a ter maior influência. Além disso, quanto maior o diâmetro do suporte, menos a fibra se dobra e menor é a influência da birrefringência induzida pelo dobramento da fibra, o que já foi mostrado ser prejudicial na sensibilidade. Com isto, a sensibilidade converge para um único valor em cada fibra.



(a)



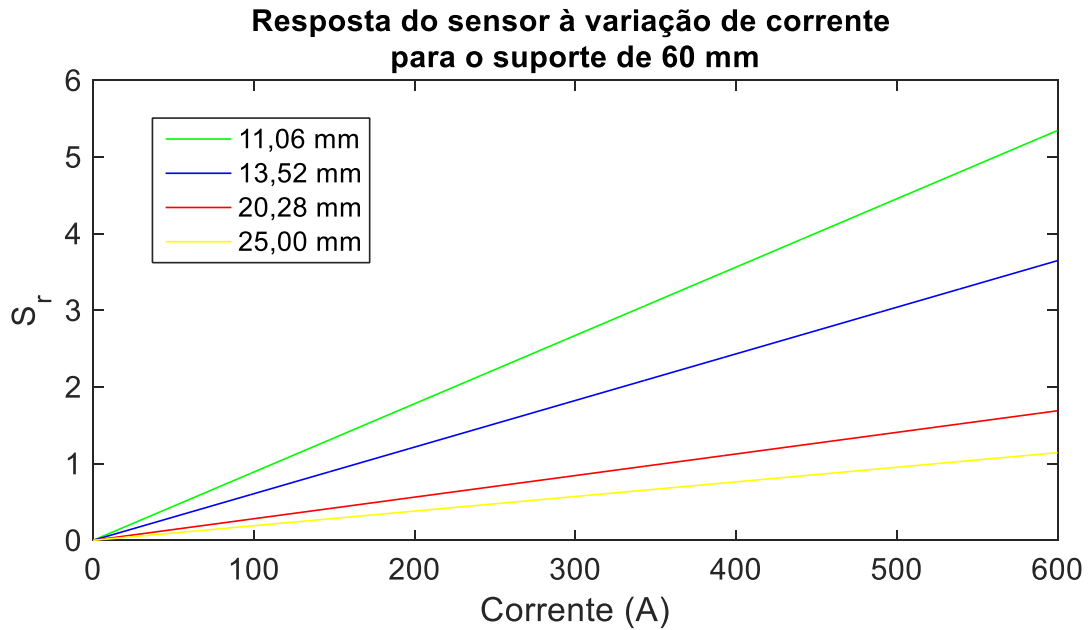
(b)

**Figura 5.10** – (a) Sensibilidade total. (b) zoom na região entre 0 e 20 mm

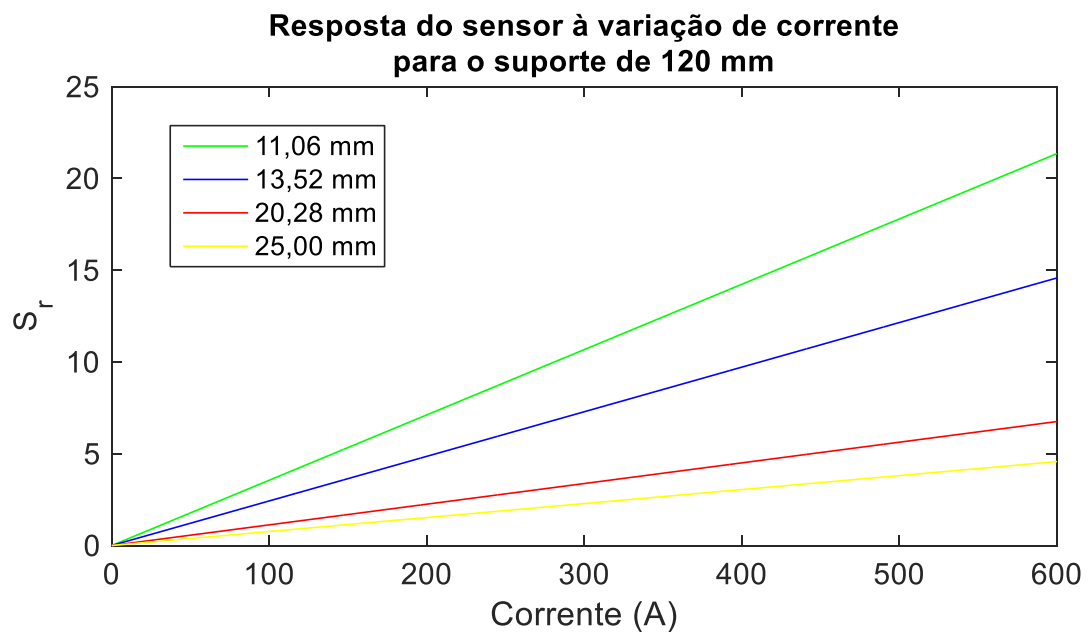
A resposta do sensor,  $S_r$ , em função da variação de corrente,  $I$ , é simulada a partir da relação [96]:

$$S_r = P \cdot m_{\text{ind}} \quad (5.11)$$

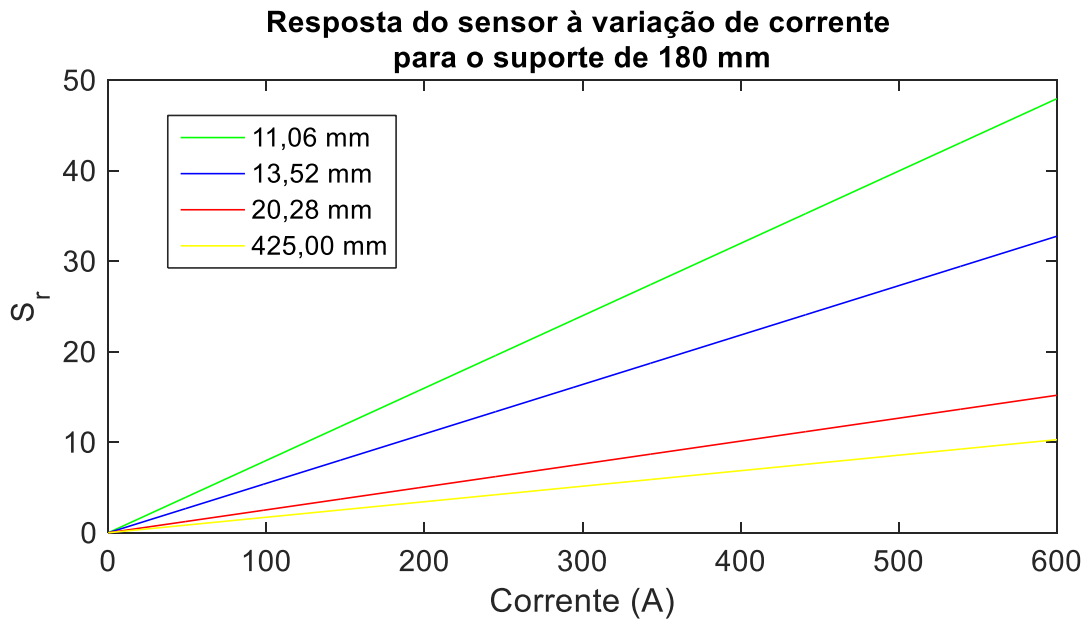
onde  $P = 2\theta_f = 2 \times (\mu \cdot V \cdot N \cdot I)$  e  $\theta_f$  é o ângulo de rotação de Faraday. O resultado é mostrado na Figura 5.11, onde é possível observar que as configurações com maiores suportes e fibras de menor período circular (maior rps) apresentam uma variação maior na resposta. Ou seja, quanto maior a sensibilidade do conjunto fibra/suporte, maior a variação da resposta, o que significa que podemos seleccionar a melhor leitura possível da corrente através destes parâmetros.



(a)



(b)



(c)

**Figura 5.11** – Resposta à variação de corrente usando os suportes de 6cm em (a), 120 mm em (b) e 180 mm em (c).

Ainda, observando a Figura 5.11, verifica-se uma boa semelhança entre configurações que usam a mesma fibra nos suportes de 180 e 120 mm. Isso ocorre porque existe uma pequena diferença de sensibilidade levando em consideração os parâmetros combinados de birrefringência circular e induzida para essas configurações. É possível observar na Figura 5.10 (a), também, que utilizando suportes menores nota-se uma perda maior na sensibilidade. Desta forma, a fibra de 13,52 mm (9 rps) nos suportes de 120 e 180 mm obtém uma resposta melhor em relação à fibra de 11 rps enrolada no suporte de 60 mm.

# Conclusão e Propostas de Trabalhos Futuros

Neste trabalho foi desenvolvido e caracterizado um protótipo de sensor de corrente óptica composto por uma cabeça de detecção e unidade de interrogação para aplicações de medição e proteção em sistemas de alta potência. Como mostrado nos Capítulos 3 e 4 o sensor foi analisado teoricamente e experimentalmente usando uma configuração polarimétrica com o objetivo de aumentar a sensibilidade e eliminar várias fontes de ruídos e obter uma resposta independente da potência óptica.

Tal sensor foi baseado no efeito Faraday em baixa birrefringência, utilizando um prisma de vidro Schott SF57 de 8cm com alta constante de Verdet. Ele foi incorporado em um invólucro de nylon adequado para aplicações de fixação na linha de alimentação. Resultados experimentais preliminares indicaram a possibilidade de o sensor operar em diferentes comprimentos de onda, sendo, portanto, testado a 650 nm, 830 nm e 1550 nm para ter acesso à sua aplicabilidade em interrogação remota através de ligações com fibra.

Os melhores resultados foram obtidos operando o sensor a 830nm, com uma resposta linear até 17,35kA, com classe de precisão de 0,1 ou 0,2 considerando uma corrente nominal de 1,2 e 0,3 kA (raiz quadrada média), respectivamente. Este resultado foi devido a uma relação sinal/ruído melhorada derivada de ter uma fonte com 3,1 vezes mais potência óptica e também devido à uma melhor resposta dos fotodetectores no comprimento de onda de 830 nm. A sensibilidade a 830 nm também foi 3,7 vezes maior do que a obtida a 1550 nm, devido à dependência da constante de Verdet com o comprimento de onda.

A detecção de pulsos de transientes foi demonstrada através do monitoramento da operação de uma fonte de corrente, onde foram detectados vários impulsos abaixo de 10  $\mu$ s e

pode trabalhar em uma gama de  $25\text{ °C} \pm 15\text{ °C}$ . De um modo geral, os resultados demonstram a viabilidade de um sensor óptico a ser utilizado tanto como um dispositivo de medição como um dispositivo de proteção em aplicações de sistemas de alta potência.

No Capítulo 5 foi implementado um esquema de interrogação polarimétrica em quadratura para avaliar as fibras HiBi em sensores de corrente óptica, que deverá ter uma baixa dependência de temperatura e uma propagação monomodo numa ampla gama de comprimentos de onda. Os resultados revelaram que esta fibra é mais robusta contra a birrefringência linear do que a padrão, mas devido à sua fragilidade e falta de fibra, não foi possível implementar uma configuração reflexiva, como proposto em [95]. Além disso, aumentar o número de voltas também deve melhorar a sensibilidade e resolução dos sensores, mas para isso requer uma fonte de corrente mais estável, mas na época da realização do experimento não havia melhor equipamento disponível no laboratório.

Ainda no Capítulo 5 foram mostradas simulações, onde os resultados obtidos apresentaram uma dependência da sensibilidade do sensor com o número de voltas, pois uma vez que a fibra é dobrada há um efeito maior de compressão, originado uma birrefringência linear indesejada, e conseqüentemente, diminuindo a sensibilidade do sensor. Finalmente foi observado que o diâmetro do suporte, também, influencia na perda de sensibilidade total, como era esperado, a fibra de maior rps converge para um valor maior de sensibilidade. Para um intervalo do tamanho do raio do suporte de 0 a 20 cm, foi observado uma área onde as fibras de menor rps sobem mais rapidamente e ainda se mantêm com sensibilidade maior. Conforme o diâmetro do suporte foi aumentando, os valores se invertem e foi observado uma diferença nas sensibilidades de cada fibra, de forma que a maior birrefringência circular passou a ter maior influência. Também foi notado que quanto maior o diâmetro do suporte, menos a fibra se dobra e menor é a influência da birrefringência induzida pelo dobramento da fibra, o que já havia sido dito anteriormente que atrapalha na sensibilidade.

### **6.1. Propostas de trabalhos futuros**

Dar continuidade neste trabalho na forma de projeto através do Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica (PIBIC) ou um programa de Mestrado/Doutorado, em parceria com o Campus Universitário Salinópolis, UNICAMP, ELETRONORTE, LEA, CEFET-RJ, no qual poderíamos implementar o laboratório de Eletromagnetismo Avançado – LEA. Neste laboratório poderão ser feitas as montagens experimentais para fazer testes e saber a

confiabilidade dos sensores como técnicas de metrologia e usar o protótipo como padrão de calibração.

O estado da arte mostra que outros materiais podem ser testados em substituição do SF57 com diferentes comprimentos de onda compatíveis, inclusive, com os cabos OPGW. Desta forma poderemos implementá-lo e buscar novas parcerias para testá-los, com a Eletronorte, por exemplo, uma vez que tal Empresa possui um laboratório central com máquinas de ensaio que pode ser utilizado para validar os novos sensores.

Além disso, embora tenham sido feitos testes experimentais e uma análise numérica usando as fibras PCF HiBi para saber a resposta do sensor de corrente, ainda é necessário fazer uma análise mais detalhada dos resultados experimentais em laboratório, para saber os limites de desempenho que podem ser alcançados por tais sensores de corrente e para isso é necessário fazer modelagem no Consol com diferentes microestruturas, para melhorar a sensibilidade e a estabilidade do sensor com novas fibras fabricadas pelo LaFE – UNICAMP, que também poderão ser testados e comparados com as fibras comerciais.

## 6.2. Produções Científicas

### 6.2.1 Artigos em Revistas Científicas Internacionais

- 1) I. M. Nascimento, **BRÍGIDA, A. C. S.**, J. M. Baptista, J. C. W. A. Costa, M. A. G. Martinez, P. A. S. Jorge, **Novel Optical Current Sensor for Metering and Protection in High Power Applications**, *Instrumentation Science & Technology*, vol. 44, no. 2, pp. 148-162, 2015.
- 2) **BRÍGIDA, A. C. S.**, I. M. Nascimento, S. Mendonça, J. C. W. A. Costa, M. A. G. Martinez, J. M. Baptista, and P. A. S. Jorge, **Experimental and theoretical analysis of an optical current sensor for high power systems**, *Photonic Sensors*, vol. 3, no. 1, pp. 26–34, 2012.

### 6.2.2 Trabalhos publicados em anais de eventos (completo)

- 1) I. M. Nascimento, G. Chesini, **BRÍGIDA, A. C. S.**, J. G. Hayashi, J. M. Baptista, J. C. W. A. Costa, M. A. G. Martinez, P. A. S. Jorge, Cristiano M. B. Cordeiro, **Fabrication and characterization of spun HiBi PCF fibers for current sensing applications**, in *23rd International Conference on Optical Fibre Sensors – OFS2014*, Santander, June 2014, pp.1-4.



2) NASCIMENTO, I. M.; **BRÍGIDA, A. C. S.**; BAPTISTA, J. M.; COSTA, J. C. W. A.; MARTINEZ, M. A. G.; JORGE, P. A. S. **Development of an electrical current sensor prototype for applications in high-power lines**, in 8th Ibero American Optics Meeting/11th Latin American Meeting on Optics, Lasers, and Applications – RIAO/OPTILAS, Porto, 2013.

3) **BRÍGIDA, A. C. S.**, I. M. Nascimento, G. Hesinid, J. G. Hayashid, J. M. Baptista, J. C. W. A. Costa, and C. M. B. Cordeiro, **Fabrication of a spun elliptically birefringent photonic crystal fiber and its characterization as an electrical current sensor**. in *Fifth European Workshop on Optical Fibre Sensors*, - EWOFS, Krakow, Maio 2013, vol. 2, no. 1, pp. 1–4.

4) NASCIMENTO, I. M.; J.C.W.A.Costa; MARTINEZ, M. A. G.; BAPTISTA, J. M.; JORGE, P. A. S.; **BRIGIDA, A.C.S.** **Sensor magnetoóptico para aplicações em linhas de alta tensão**. In: 18ª Conferência Nacional de Física e o 22º Encontro Ibérico para o Ensino da Física, FÍSICA 2012: Comunicação e Informação em Ciência. Aveiro, 2012.

5) **BRIGIDA, A.C.S.**; NASCIMENTO, I. M.; COSTA, J. C. W. A.; BAPTISTA, J. M.; JORGE, P. A. S.; MARTINEZ, M. A. G. **Tecnologia de sensores ópticos para supervisão, controle e proteção de sistemas de energia elétrica**. In: 15º SBMO Simpósio Brasileiro de Micro-ondas e Optoeletrônica e o 10º CBMag Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo – MOMAG. Joao Pessoa, 2012.

### 6.2.3 Trabalhos publicados em anais de eventos (resumo)

1) **BRIGIDA, A.C.S.**; NASCIMENTO, I. M.; JORGE, P. A. S.; COSTA, J. C. W. A.; MARTINEZ, M. A. G.; BAPTISTA, J. M. **Theoretical analysis towards the deployment of optical current sensors in high power systems**. In: X Symposium on Enabling Optical Networks and Sensors – SEONs. Porto, 2012.

2) COSTA, J. C. W. A.; **BRIGIDA, A.C.S.**; MARTINEZ, M. A. G.; BAPTISTA, J. M.; NASCIMENTO, I. M.; JORGE, P. A. S. **Magneto-optic sensor for hipower applications**. In: X Symposium on Enabling Optical Networks and Sensors – SEONs. Porto, 2012.

#### 6.2.4 Apresentação Oral de Trabalhos em eventos (resumo)

1) **BRIGIDA, A.C.S.**; COSTA, J. C. W. A.; MARTINEZ, M. A. G; NASCIMENTO, I. M.; BAPTISTA, J. M.; JORGE, P. A. S. **Optical sensor technology for monitoring, control and protection of electrical power systems**. In: 1st PhD. Students Conference in Electrical and Computer Engineering - StudECE. Porto, 2012.

# Referências

- 1 - Empresa de Pesquisa Energética. Visitado em 02/02/2017. Disponível em: [www.epe.gov.br](http://www.epe.gov.br).
- 2 - H. J. El-Khozondar, M. S. Muller, R. J. El-Khozondar, and A. W. Koch, "*Magnetic field inhomogeneity induced on the Magneto-optical current sensors*," in Information Photonics (2011), pp. 1–2.
- 3 - F. Rahmatian, "*High-Voltage Current and Voltage Sensors for a Smarter Transmission Grid and their Use in Live-Line Testing and Calibration*," in Power and Energy Society General Meeting (2010), pp. 10–12.
- 4 - B. Gholamzadeh and H. Nabovati, "*Fiber Optic Sensors*" World Acad. Sci. Eng. Technol. 42, 297–307 (2008).
- 5 - Y. N. Ning, Z. P. Wang, A. W. Palmer, K. T. V. Grattan, and D. A. Jackson, "*Recent progress in optical current sensing techniques*", Rev. Sci. Instrum. 66, 3097 (1995).
- 6 - H. Lin, W. Lin, and M. Chen, "*Modified in-line Sagnac interferometer with passive demodulation for environmental immunity of a fiber-optic current sensor*" Appl. Opt. 38, 2760–2766 (1999).
- 7 - G. Frosio and R. Dandliker, "*Reciprocal reflection interferometer for a fiber-optic Faraday current sensor*" Appl. Opt. 33, 6111–6122 (1994).
- 8 - S. Yin, P. B. Ruffin, and F. T. S. Yu, "*Fiber Optic Sensors*", Second edi (CRC Press, 2008).
- 9 - W. Na and W. Quan, "*Application of the Fiber Optical Current Transformer in the 110kV Smart Substation*" in Power and Energy Engineering Conference (2012), pp. 1–4.
- 10 - J. Zubia, L. Casado, G. Aldabaldetrek, A. Montero, E. Zubia and G. Durana, "*Design and Development of a Low-Cost Optical Current Sensor*", Sensors 2013, 13, 13584-13595.
- 11 - G. Keiser, "*Optical Fiber Communications*". McGraw-Hill, 2000.
- 12 - E. Hecht, "*Ótica*", 2nd ed. Fundação Calouste Gulbenkian, 2002.

- 13 - S. Polisetty, J. Scheffler, S. Sahoo, Y. Wang, T. Mukherjee, X. He, and C. Binek, "*Optimization of magneto-optical Kerr setup: Analyzing experimental assemblies using Jones matrix formalism*", Rev. Sci. Instrum. 79, pg. 055107, 2008;
- 14 - M. Faraday, "*Experimental Researches in Electricity*", And Twentieth Series. Section 26th. On New Magnetic Actions; and on the Magnetic Condition of All Matter. Trans. Roy. Soc. (London) 5, 592 (1846).
- 15 – F. A. Jenkins, H. E. White, "*Fundamental of Optics*", p. 597-598, 1953;
- 16 – F. J. Loeffler, "*A Faraday Rotation Experiment for Undergraduate Physics Laboratory*", American Journal of Physics, 51, 661-663 (1983);
- 17 – F. L. Pedrotti and P. Bandettini, "*Faraday Rotation in the Undergraduate Advanced Laboratory*", American Journal of Physics, vol. 58, p. 542-545, 1989;
- 18 – B. E. A. Saleh, M. C. Teich, "*Fundamentals of photonics*", 1991: John Wiley & Sons, Inc.
- 19 – P. A. Williams, A. H. Rose, G. W. Day, T. E. Miller, and M. N. Deeter, "*Temperature dependence of the Verdet constant in several diamagnetic glasses*". Applied Optics. 30(10):p. 176-1178, 1991;
- 20 - G. W. Day, M. N. Deeter, A. H. Rose, "*Faraday effect sensors: a review of recent progress*", in SPIE. 1992. P. 11-26;
- 21 - R. Alan, "*Polarization in Optical Fibers*", Artech House, 2008.
- 22 - G. Westenberger, H. J. Hoffmann, W. W. Jochs, and G. Przybilla, "*The Verdet constant and its dispersion in optical glasses*" in Passive Materials for Optical Elements (1991), Vol. 1535, pp. 113–120.
- 23 - M. J. Weber, "*Handbook of Laser Science and Technology Supplement 2: Optical Materials*", in CRC Press, 1994.

- 24 - Z. Wang, H. Wang, H. Jiang, X. Liu, “*A magnetic field sensor based on orthoconjugate reflection used for current sensing*”, Opt. Laser Technol. 2007, 39, 1231–1233.
- 25 - Asea Brown Boveri - Visitado em 02/02/2017. Disponível em: <http://www.abb.com/cawp/seitp202/31b6f1d9686553b1c12579880036eaaa.aspx>.
- 26 – Pioneer of the transformer and AC distribution systems. Visitado em 02/02/2017. Disponível em: <http://edisontechcenter.org/WilliamStanley.html>.
- 27 – L. Bertini, “*Transformadores*”, Editora Clube de Autores, 2015.
- 28 – I. Lionel, “*Máquinas elétricas e transformadores*”, Vol 1, Kosow, 689.
- 29 - G. A. Simone, “*Transformadores*”. São Paulo: Érica, 1998.
- 30 – D. K. Lima, “*Transformadores para instrumentos ópticos: Aspectos da viabilidade do seu uso pelas empresas do setor elétrico brasileiro*”. 2009. Mestrado em Engenharia – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.
- 31 - Empresa SOLTRAN Transformadores. Visitado em 02/02/2017. Disponível em: <http://www.soltran.com.br>.
- 32 - ABNT NBR 6856:2015 - Visitado em 02/02/2017. Disponível em: <http://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?ID=329301>.
- 33 – J. Blake, P. Tantaswadi, R. Carvalho, “*In-line sagnac interferometer current sensor*”. IEEE Trans. Power Delivery 1996, 11, 116–121.
- 34 – D. A. Jackson, “*An optical system with potential for remote health monitoring of subsea machinery*”, Meas. Sci. Technol. 2009, 20, 1–8.
- 35 – T. Sato, G. Takahashi, and Y. Inui, “*Method and apparatus for optically measuring a current*”, 1986.
- 36 - N. Fisher and D. Jackson, “*Vibration Immunity for a Triangular Faraday Current Sensor*” Fiber Integr. Opt. 16, 321–328 (1997).

- 37 – S. He, “*New way to reduce the reflection-induced phase difference while sensing current with bulk glass*”, SPIE 2895, Fiber Optic Sensors V, 1996.
- 38 - S. Zilio, “*Óptica moderna*”. Instituto de Física de São Carlos. Universidade de São Paulo. 2009
- 39 – M. Sudo, M. Nakai, K. Himeno, S. Suzaki, A. Wada, R. Yamauchi, “*Simultaneous measurement of temperature and strain using panda fiber grating*”. Proceedings of 12th International Conference on Optical Fiber Sensors; Williamsburg, VA, USA. 28 October 1997.
- 40 – S. P. Bush and D. A. Jackson, “*Numerical investigation of the effects of birefringence and total internal reflection on Faraday effect current sensors*”, Appl. Opt. 1992, 31, 5366–5374.
- 41 – T. Sato, G.T. Takahashi, Y. Inui, “*Method and apparatus for optically measuring a current*”. Patent Number: 4564754, 1986.
- 42 – Z. P. Wang, B. Qing, J. Z. Q. Yi, H. Jin, “*Wavelength dependence of the sensitivity of a bulk-glass optical current transformer*”, Opt. Laser Technol. 2006, 38, 87–93.
- 43 – Z. P. Wang, X. Wang, X. Liu, C. Ouyang and Q. Tan, “*Effect of the spectral width of optical sources upon the output of an optical current sensor*”, Meas. Sci. Technol. vol. 16, p.1588–1592, 2005;
- 44 - I. J. Lawrence, C. G. A. Koreman, W. R. Rutgers, A. H. van der Wey, “*Applications for optical current and voltage sensors*”. Sensors Actuators, 1989. 17: p. 181-186.
- 45 – P. A. S. Jorge, “*Sensores ópticos para medição decorrente eléctrica em alta-tensão*”, Departamento de Física, Universidade do Porto, 2001.
- 46 – K. Kurosawa, K. Sakamoto, S. Yoshida, “*Polarization-Maintaining Properties of the Flint Glass-Fiber for the Faraday Sensor Element*”. In the Tenth International Conference on Optical Fiber Sensors, Glasgow, Scotland, 11 October 1994; pp. 28–35.
- 47 – T. Yamashita, A. Watabe, I. Masuda, K. Sakamoto, K. Kurosawa, S. Yoshida, “*Extremely Small Stress-Optic Coefficient Glass Single Mode Fibers for Current Sensor*”. In Optical Fiber Sensors 11, Japan, 21 May 1996; pp. 168–171.

- 48 – K. Kurosawa, “*Optical current transducers using flint glass fiber as the Faraday sensor element*”. *Opt. Rev.* 1997, 4, 38–44.
- 49 – K. Barczak, T. Pustelny, D. Dorosz, J. Dorosz, “*New optical glasses with high refractive indices for applications in optical current sensors*”. *Acta Phys. Pol. A* 2009, 116, 247–249.
- 50 – L. Sun, S. Jiang, J. D. Zuegel, J. R. Marciante, “*Effective verdet constant in terbium-doped-core*”. *Opt. Lett.* 2009, 34, 1699–1701.
- 51 – L. Sun, S. Jiang, J. R. Marciante, “*Compact all-fiber optical Faraday components using 65-wt%-terbium-doped fiber with a record Verdet constant of  $-32 \text{ rad}/(\text{Tm})$* ”. *Opt. Express* 2010, 18, 12191–12196
- 52 – P. Drexler, P. Fiala, “*Utilization of Faraday mirror in fiber optic current sensors*”, *Radio engineering* 2008, 17, 101–107.
- 53 – S. Zhou, X. Zhang, “*Simulation of linear birefringence reduction in fiberoptical current sensor*”. *IEEE Photon. Technol. Lett.* 2007, 19, 1568–1570.
- 54 - R. I. Laming and D. N. Payne, “*Electric current Sensors employing Spun Highly Birefringent Optical Fibers*” *Journal of Lightwave Technology* 7(12), 2084–2094 (1989).
- 55 - T. Bosselmann, in *Proc. 9th Int. Conf. on Optical Fibre Sensors (OFS-9)*, p. 297, Florence, Italy, May 4–6, 1993 (IROECNR, Florence, 1993).
- 56 - Rose A.H., Polinkin PG., Blake J. *Proc. Conf. OFS-14* (Venice, Italia, 2000) TH3-5.
- 57 - V. P. Gubin, V. A. Isaev, S. K. Morshnev, A. I. Sazonov, N. I. Starostin, Y. K. Chamorovsky, and A. I. Oussov, “*Use of Spun optical fibres in current sensors*”, *Quantum Electronics* 36(3), 287–291 (2006).
- 58 - Power Transmission and Distribution. By Siemens. Visited in 10/09/2011. <http://www.siemens.com>.
- 59 - N. Itoh, H. minemoto, D. Ishiko, and Ishizuka. “*Commercial current sensor activity in Japan*”. in *OFS 10*. 1994. Glasgow, U.K.p.92-95;

- 60 – F. Bucholtz, D.M. Dagenais, K.P. Koo, “*Mixing and detection of Rf signals in fibre-optic magnetostrictive sensor*”. *Electron. Lett.* 1989, 25, 1285–1286.
- 61 - Ortigosa-Blanch, et al. “*Highly birefringent photonic crystal fibers*”. September 15, 2000 / Vol. 25, No. 18 / *Optics Letters*.
- 62 - T. Nasilowski et al. “*Temperature and pressure sensitivities of the highly birefringent photonic crystal fiber with core asymmetry*”, *Appl. Phys. B* 81, 325–331 (2005).
- 63 – M. Sharma, N. Borogohain, S. Konar, “*Index guiding photonic crystal fibers with large birefringence and walk-off*”, *J. Lightwave Technol.* 2013, 31, 3339–3344.
- 64 – P. Hlubina, T. Martynkien, J. Olszewski, P. Mergo, M. Makara, K. Poturaj, W. Urbanczyk, “*Spectral-domain measurements of birefringence and sensing characteristics of a side-hole microstructured fiber*”. *Sensors* 2013, 13, 11424–11438.
- 65 - M. J. Steel, R. M. Osgood, “*Elliptical hole photonic crystal fibers*”. *Opt. Lett.* 2001, 26, 229–231.
- 66 – S. E. Kim, B. H. Kim, C. G. Lee, S. Lee, K. Oh, C. S. Kee, “*Elliptical defected core photonic crystal fiber with high birefringence and negative flattened dispersion*”. *Opt. Express* 2012, 20, 1385–1391.
- 67 – S. M. M. Quintero, “*Desenvolvimento de um sensor de campo magnético baseado em fibras ópticas para a monitoração em hidrogenadores*”, 2010. Tese de Doutorado - PUC do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.
- 68 – A. Yariv, H. V. Winsor, “*Proposal for detection of magnetic-fields through magnetostrictive perturbation of optical fibers*”. *Opt. Lett.* 1980, 5, 87–89.
- 69 – A. Dandridge, A. B. Tveten, G. H. Sigel, E. J. West, T. G. Giallorenzi, “*Optical fiber magnetic-field sensors*”, *Electron. Lett.* 1980, 16, 408–409.
- 70 – K. P. Koo, G. H. Sigel, “*Characteristics of fiberoptic magnetic-field sensors employing metallic glasses*”. *Opt. Lett.* 1982, 7, 334–336.



- 71 – A. D. Kersey, D. A. Jackson, M. Corke, “*Single-mode fibre-optic magnetometer with DC bias field stabilization*”, J. Lightwave Technol. 1985, 3, 836–840.
- 72 – F. Bucholtz, K. P. Koo, A. Dandridge, “*Effect of external perturbations on fiber-optic magnetic sensors*”, J. Lightwave Technol. 1988, 6, 507–512.
- 73 – J. Jarzynski, J. H. Cole, J. A. Bucaro, C. M. Davis, “*Magnetic-field sensitivity of an optical fiber with magnetostrictive jacket*”. Appl. Opt. 1980, 19, 3746–3748.
- 74 – M. Sedlar, I. Paulicka, M. Sayer, “*Optical fiber magnetic field sensors with ceramic magnetostrictive jackets*”. Appl. Opt. 1996, 35, 5340–5344.
- 75 – J. Mora, A. Diez, J. L. Cruz, M. V. Andres, “*A magnetostrictive sensor interrogated by fiber gratings for DC-Current and temperature discrimination*”. IEEE Photon. Technol. Lett. 2000, 12, 1680–1682.
- 76 - S. M. M. Quintero, C. Martelli, A. M. B Braga, L. C. G. Valente, C. C. Kato, “*Magnetic field measurements based on terfenol coated photonic crystal fibers*”, Sensors 2011, 11, 11103–11111.
- 77 - J. Xia, F. Wang, H. Luo, Q. Wang, S. Xiong. “*A Magnetic Field Sensor Based on a Magnetic Fluid-Filled FP-FBG Structure*”, Sensors 2016, 16(5), 620.
- 78 – Y. N. Ning, B. C. B. Chu, D. A. Jackson, “*Interrogation of a conventional current transformer by a fiberoptic interferometer*”, Opt. Lett. 1991, 16, 1448–1450.
- 79 – Y. N. Ning, T. Y. Liu, D.A. Jackson, “*Two low-cost robust electrooptic hybrid current sensors capable of operation at extremely high-potential*”. Rev. Sci. Instru. 1992, 63, 5771–5773.
- 80 – O. Tonnesen, N. Beatty, O. Skilbreid, “*Electrooptic methods for measurement of small DC currents at high-voltage level*”, IEEE Trans. Power Delivery 1989, 4, 1568–1572.
- 81 – N. A. Pilling, R. Holmes, G. R. Jones, “*Optical-fiber line current measurement system*”, In Sixth International Conference on Dielectric Materials, Measurements and Applications, Manchester, England, 7 September 1992, 363, 278–281.

82 – MOCT-P - Optical Instrument Transformer. Visitado em 02/02/2017. Disponível em: <http://tdworld.com/blog/abb-launches-new-moct-p-optical-instrument-transformer-relaying-high-voltage-network-applicatio>.

83 – FOCS - fibre-optic current sensor. Visitado em 02/02/2017. Disponível em: <http://new.abb.com/power-electronics/focs>.

84 – COSI-NXCT, Optical Current Transformer. Visitado em 02/02/2017. Disponível em: [http://www.alstom.com/Global/US/Resources/Documents/IEEE%20TD%2012/DIT\\_OpticalCurrentTransformers.pdf](http://www.alstom.com/Global/US/Resources/Documents/IEEE%20TD%2012/DIT_OpticalCurrentTransformers.pdf).

85 – AIRAK, Visitado em 02/02/2017. Disponível em: <http://datasheets.globalspec.com/ds/290/Airak>.

86 – DISCOS, Current Sensor, Visitado em 02/02/2017. Disponível em: <http://www.sensorzine.com/datasheet-of-power-sense-discos-current-sensor-944.html>.

87 – H. M. Nussenzveig, “Curso de Física Básica - 3 – Eletromagnetismo”, 3 ed, Editora Edgard Blucher Ltda (2003).

88 - C. C. Kato, A. M. B. Braga, L. C. G. Valente, L. P. Salvini, C. Fortier, M. M. Nogueira, “Sensor a fibra óptica para Medição de Correntes Elevadas em Linhas de Transmissão”, 2007;

89 – SRS. Lock-in Amplifier SR850

90 – National Instrumets DAQ USB High-Speed

91 – Visitado em 02/02/2017. Disponível em: <http://refractiveindex.info/?shelf=glass&book=SCHOTT-SF&page=SF57>.

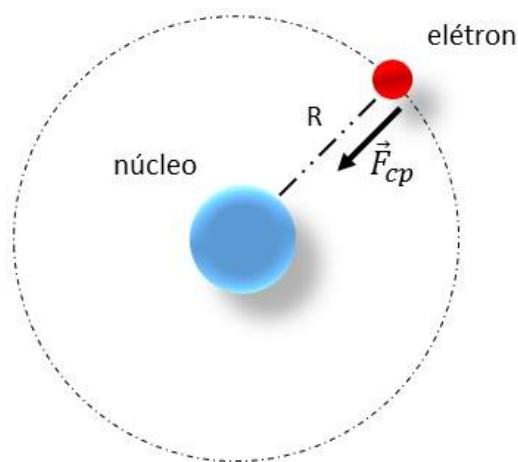
92 - HIGH POWER DFB LASERS, Visitado em 02/02/2017. Disponível em: [https://goochandhousego.com/wp-content/uploads/2017/02/GH\\_DS\\_FO\\_HighPowerDFBLaser\\_AA1401\\_7009\\_Rev12.pdf](https://goochandhousego.com/wp-content/uploads/2017/02/GH_DS_FO_HighPowerDFBLaser_AA1401_7009_Rev12.pdf).

93 – "Epoxy Technology, Visitado em 02/02/2017. Disponível em: Inc.," [http://www.epotek.com/site/component/products/productdetail.html?cid\[0\]=231](http://www.epotek.com/site/component/products/productdetail.html?cid[0]=231)".

- 94 – S. D. Targonski, "Compensation for temperature dependence of faraday effect in diamagnetic materials: application to optical fibre sensors", *Electron. Lett.* 27, 1131–1132 (1991).
- 95 – I. M. Nascimento, "Optical fiber sensors technology for supervision, control and protection of high power systems", Departamento de Física e Astronomia, Universidade do Porto, 2016.
- 96 - I. M. Nascimento, G. Chesini, A. C. S. BRÍGIDA, J. G. Hayashi, J. M. Baptista, J. C. W. A. Costa, M. A. G. Martinez, P. A. S. Jorge, Cristiano M. B. Cordeiro, "Fabrication and characterization of spun HiBi PCF fibers for current sensing applications", in *23rd International Conference on Optical Fibre Sensors – OFS2014*, Santander, June 2014, pp.1-4.
- 97 - A. Michie, J. Canning, K. Lyytikäinen, M. Aslund, and J. Digweed, "Temperature independent highly birefringent photonic crystal fibre" *Optics express* 12(21), 5160–5165 (2004).
- 98 - A. Michie, J. Canning, I. Bassett, J. Haywood, K. Digweed, M. Åslund, B. Ashton, M. Stevenson, and J. Digweed, "Spun elliptically birefringent photonic crystal fibre", *Opt. Express* 15 (4), 1811-1816 (2007).
- 99 - P. Russell, "Photonic crystal fibers", *Science (New York, N.Y.)* 299(5605), 358–362 (2003).
- 100 - R. Ulrich, S. C. Rashleigh, W. Eickhoff, "Bending-induced birefringence in single-mode fibers", *Optics Letter*, 5, 273, 1980.
- 101 – K. D. Machado, "Teoria do eletromagnetismo. Vol. 2, 2ª Ed. Ponta Grossa: Editora UEPG, 2004.

# APÊNDICE A – Rotação de Faraday

Vamos considerar um átomo de hidrogênio com um elétron movendo-se em órbita circular ao redor do núcleo (ver Figura A.1).



**Figura A.1** - Ilustração do átomo de hidrogênio, onde o elétron se move em órbita circular ao redor do núcleo sob a ação da força centrípeta  $\vec{F}_{cp}$ .

Na ausência de um campo magnético externo, o elétron executa movimento circular devido a força centrípeta, ou seja [101]:

$$\vec{F}_{cp} = m\vec{a}_{cp} \quad (\text{A.1})$$

onde  $m$  é a massa do elétron, e  $\vec{a}_{cp}$  é a aceleração centrípeta dada por:

$$\vec{a}_{cp} = \frac{v^2}{R} \quad (\text{A.2})$$

na qual  $R$  é o raio da órbita e  $v$  é a velocidade do elétron. Substituindo a Equação A.2 na Equação A.1, temos:

$$F = \frac{mv^2}{R} \quad (\text{A.3})$$

Lembrando que a velocidade linear e a frequência angular  $\omega$  são relacionadas por  $v = \omega R$ , podemos reescrever a Equação A.3 na seguinte forma:

$$F = m\omega^2 R \quad (\text{A.4})$$

Para uma força infinitesimal, podemos diferenciar a Equação A.4 em relação  $\omega$ , ou seja:

$$dF = 2m\omega R d\omega \quad (\text{A.5})$$

Do eletromagnetismo clássico, sabemos que a força magnética sobre qualquer partícula com carga  $q$  é dada por:

$$F = q|v||B| \sin \theta \quad (\text{A.6})$$

onde  $\theta$  é o ângulo entre a trajetória e o campo magnético. Para  $\theta = 90^\circ$  (campo perpendicular a trajetória), temos:

$$F = qvB = q\omega RB \quad (\text{A.7})$$

Diferenciando a equação A.7, obtemos:

$$dF = qRB d\omega \quad (\text{A.8})$$

Igualando as equações A.5 e A.8, obtemos:

$$2m\omega R d\omega = qRB d\omega \quad (\text{A.9})$$

De onde concluímos que,

$$\omega_L = \frac{qB}{2m} \quad (\text{A.10})$$

onde  $q = e$  e  $\omega_L = 2\pi f_L$ . A equação A.10 é conhecida como frequência de precessão de Larmor [101].

Considerando um feixe com polarização linear propagando-se em um meio. Podemos decompor essa polarização em duas ondas circularmente polarizadas a esquerda e a direita,

ambas com a mesma amplitude. Assim, as componentes à esquerda (e) e a direita (d) da onda giram com frequências  $f + f_L$  e  $f - f_L$ . Onde  $f_L$  é a frequência de Lamor dada pela equação A.10. Como em um meio dispersivo o índice de refração depende da frequência podemos escrever:

$$n_d = n(f + f_L) \quad (\text{A.11})$$

$$n_e = n(f - f_L) \quad (\text{A.12})$$

Considere a propagação de um pulso de luz através de um meio dispersivo de comprimento L. A característica dispersiva do meio é descrita pelo índice de refração  $n(\omega)$ . Assim cada componente espectral terá um defasamento na fase dado por:

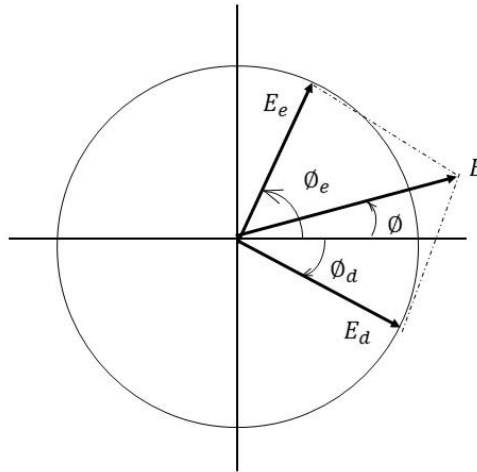
$$\phi(\omega) = \frac{\omega}{c} n(\omega) L \quad (\text{A.13})$$

Lembrando que a relação entre frequência angular ( $\omega$ ) e comprimento de onda ( $\lambda$ ) é  $\omega = 2\pi c/\lambda$ , onde  $c$  é a velocidade da luz, podemos escrever, usando as equações (A.11), (A.12) e (A.13), os deslocamentos na fase a direita ( $\phi_d$ ) e a esquerda ( $\phi_e$ ) em relação a fase inicial  $\phi = 0$ :

$$\phi_d = \left(\frac{n_d L}{\lambda}\right) 2\pi \text{ e } \phi_e = \left(\frac{n_e L}{\lambda}\right) 2\pi \quad (\text{A.14})$$

Da Figura A.2 podemos obter as relações entre esses ângulos como sendo:

$$\phi = \frac{1}{2}(\phi_e - \phi_d) \quad (\text{A.15})$$



**Figura A.2** - Ilustração das duas fases  $\phi_d$  e  $\phi_e$  tomadas com relação à fase inicial  $\phi = 0$ . O campo elétrico emergente é mostrado girado de um ângulo  $\phi$  com relação à sua orientação inicial.

Substituindo a Equação (A.13) em (A.14) e usando (A.10) e (A.11), obtemos:

$$\phi = \frac{1}{2} \left( \frac{2\pi L}{\lambda} \right) [n(f - f_L) - n(f + f_L)] \quad (\text{A.15})$$

Lembrando que a definição de derivada simétrica de uma função  $f$  num ponto  $x$  é dada por:

$$\frac{df}{dx} \lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(x+h) - f(x-h)}{2h} \quad (\text{A.16})$$

Usando a definição acima, obtemos que  $n(f - f_L) - n(f + f_L) = -2f_L \frac{dn}{df}$ . Logo, a Equação A.15 pode ser reescrita da seguinte forma:

$$\phi = \frac{1}{2} \left( \frac{2\pi L}{\lambda} \right) \left( -2f_L \frac{dn}{df} \right) \quad (\text{A.17})$$

Sabendo que  $f = c/\lambda$  e que implica na derivada  $df = -(c/\lambda^2)d\lambda$ , então, a Equação A.17 torna-se:

$$\phi = \frac{1}{2} \left( \frac{2\pi L\lambda}{c} \right) \left( f_L \frac{dn}{d\lambda} \right) \quad (\text{A.18})$$

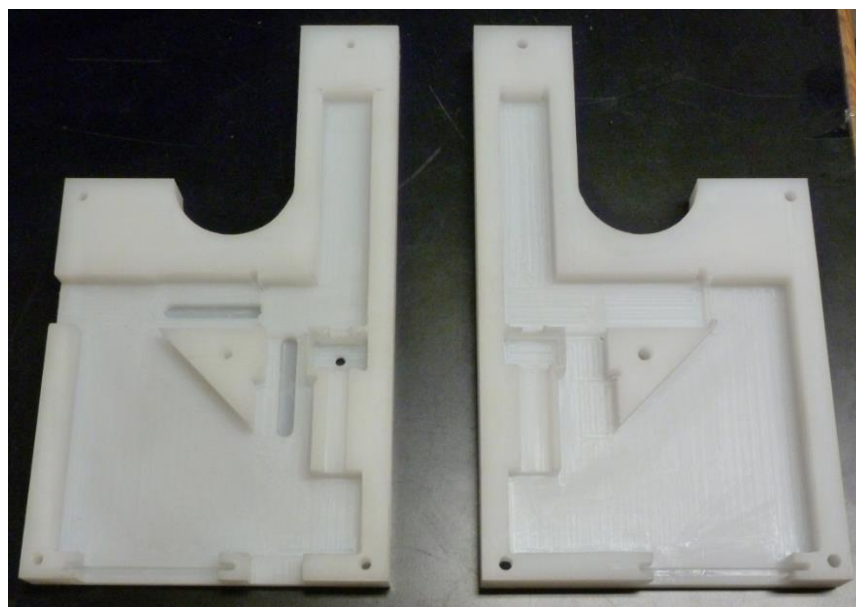
Usando a expressão da frequência de Larmor dada pela Equação A.8 na Equação A.18 obtemos:

$$\phi = \left( \frac{e\lambda}{2mc} \frac{dn}{d\lambda} \right) LB \quad (28)$$



# APÊNDICE B – Montagem do Protótipo

Na Figura B.1 é mostrada as placas de Nylon inferior e superior que servem de suporte para encapsular o sensor. A da direita e da esquerda correspondem à placa de baixo e de cima, respectivamente. A da direita será utilizada para posicionar os componentes ópticos, incluindo o prisma SF-57 e os cubos divisor de feixe (BS) e polarizador com divisor de feixe (PBS).

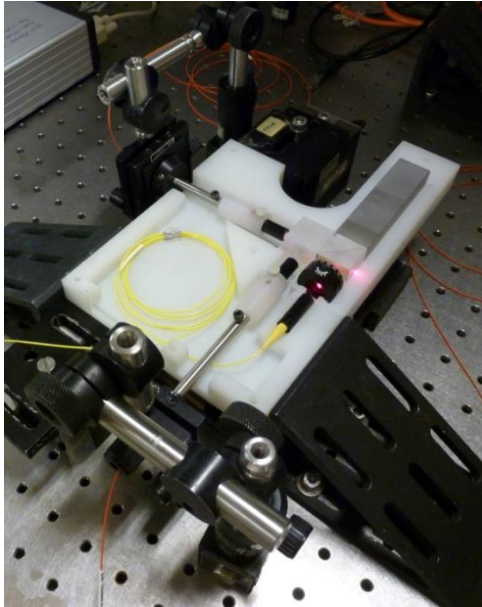


**Figura B.1** – Suportes para encapsular o sensor.

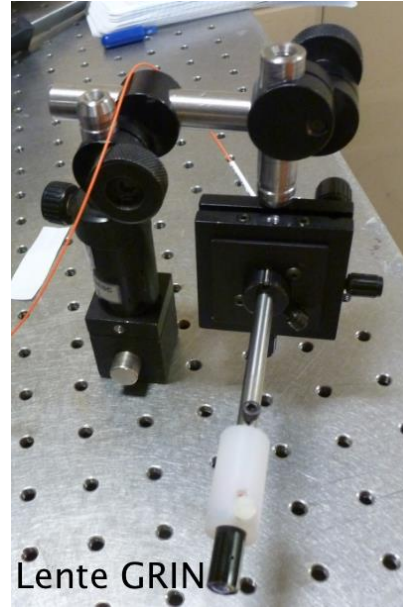
Na Figura B.2 (a) uma foto do sensor na placa inferior é exibida com os três componentes ópticos colados em conjunto com o epóxi óptico EPO-TEK 301. A lente de entrada GRIN foi também colada à placa de nylon e o polarizador de entrada foi montado em um suporte rotativo de 360 graus, Thorlabs RSP05, assegurando que ambas as saídas estão em  $\pm 45^\circ$  em relação ao polarizador de entrada e, conseqüentemente, operando com sensibilidade máxima.

As saídas da lente GRIN são alinhadas usando um estágio de posição XYZ com dois ângulos de ajuste da Newport, conforme exibido na Figura B.2 (b), reduzindo as perdas de

injeção. Embora o sensor seja maximizado para funcionar a 830 nm, uma fonte SLD a 650 nm, na gama espectral visível, foi utilizada para facilitar o primeiro alinhamento. O objetivo é colar apenas a lente na placa de nylon utilizando um adesivo de fusão a quente e após secagem a configuração de alinhamento é removida (Figura B.3 (a)).



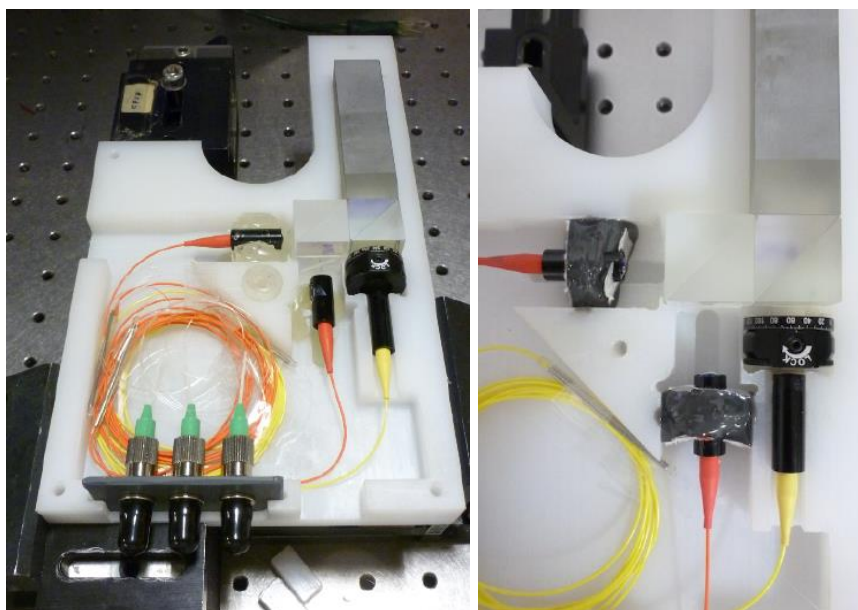
(a)



(b)

**Figura B.2** - (a) Placa inferior com os componentes ópticos e em (b) o estágio de posição XYZ com dois ângulos de ajuste.

O passo seguinte consistiu em unir todas as três lentes GRIN a tranças de fibras e ligá-las ao suporte cinzento com os conectores FC / APC apresentados na Figura B.3 (a). No entanto, o desalinhamento da lente foi observado devido a variações de temperatura. Uma outra cola, um epóxi capaz de suportar temperaturas de  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $120\text{ }^{\circ}\text{C}$  de Ceys também foi testado para ligar a lente GRIN ao suporte inferior mas o problema de desalinhamento persistiu mostrando que o problema era devido à expansão do invólucro de nylon com temperatura.

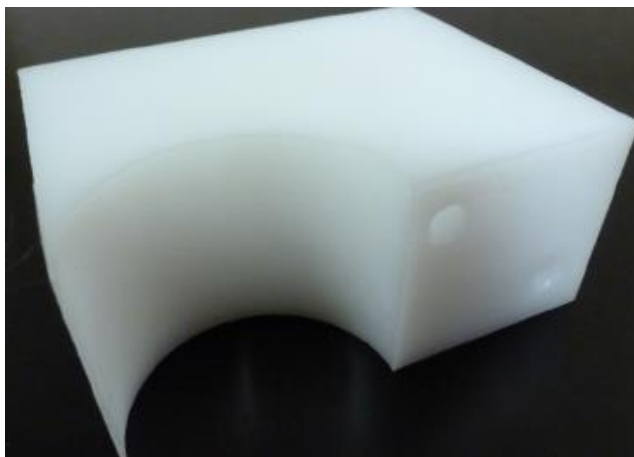


(a)

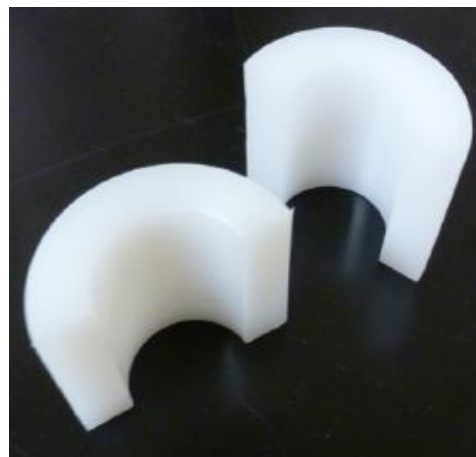
(b)

**Figura B.3** - Lente GRIN colada ao suporte inferior com (a) adesivo termofusível e com (b) epoxi de alta temperatura.

Na Figura B.4 (a) é mostrado o suporte utilizado para fixar o sensor ao condutor e na Figura B.4 (b) os anéis para fixá-lo a um cabo de 27 mm de diâmetro.



(a)



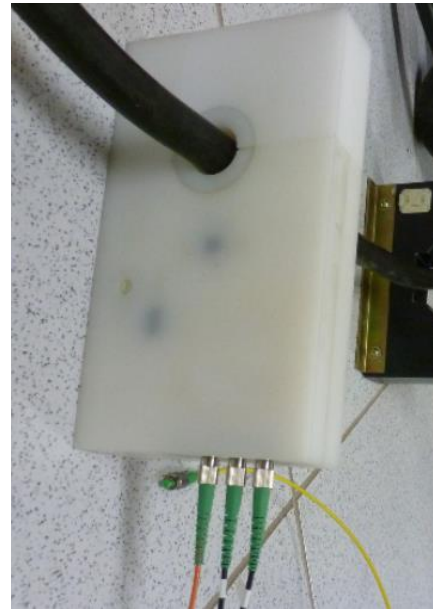
(b)

**Figura B.4** - (a) Suporte usado para fixar o sensor ao condutor e (b) os anéis para adaptar o invólucro do sensor ao diâmetro do condutor desejável.

Na Figura B.5 (a) e (b) é mostrado o protótipo do sensor antes e depois da ligação ao condutor. Em (b) são mostrados os três cabos utilizados para injetar e recolher a luz da cabeça de detecção.



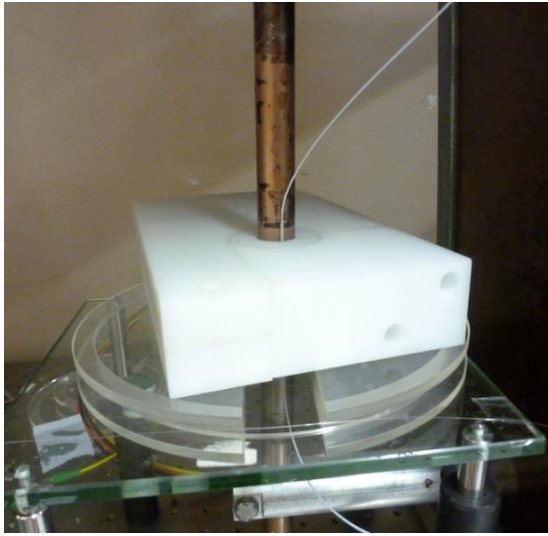
(a)



(b)

**Figura B.5** - Gabinete do sensor (a) antes e depois de ser conectado a um condutor.

Na Figura B.6 apresenta-se o *setup* utilizado para demonstrar o funcionamento do sensor óptico. Em B.6(a) o protótipo é preso ao condutor em conjunto com o sensor de temperatura desenvolvido pela FiberSensing e em B.6(b) têm-se a unidade de interrogação que é conectada ao computador através de dois cabos USB, um para a DAQ e outro para o controlador do SLD.



(a)



(b)

**Figura B.6** – (a) Protótipo com sensor de temperatura e unidade de interrogação.