



COMPENSAÇÃO DE TEMPERATURA PARA SENSORES DE CORRENTE
ELÉTRICA BASEADOS EM REDES DE BRAGG EM FIBRAS ÓPTICAS

Leandro Alves Garçon

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Marcelo Martins Werneck

Rio de Janeiro

Março de 2017

COMPENSAÇÃO DE TEMPERATURA PARA SENSORES DE CORRENTE
ELÉTRICA BASEADOS EM REDES DE BRAGG EM FIBRAS ÓPTICAS

Leandro Alves Garção

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO
LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE)
DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM
CIÊNCIAS EM ENGENHARIA ELÉTRICA.

Examinada por:

Prof. Marcelo Martins Werneck, Ph.D.

Dr. Fábio Vieira Batista de Nazaré, D.Sc.

Dr^a. Regina Célia da Silva Barros Allil, D.Sc.

Prof. Marcos Tadeu D'Azeredo Orlando, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

MARÇO DE 2017

Garção, Leandro Alves

Compensação de Temperatura para Sensores de Corrente Elétrica Baseados em Redes de Bragg em Fibras Ópticas/ Leandro Alves Garção. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2017.

XV, 59 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Marcelo Martins Werneck

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Elétrica, 2017.

Referências Bibliográficas: p. 55-59.

1. Sensores a Fibra Óptica. 2. Magnetostricção. 3. Redes de Bragg. 4. Medição de Corrente. 5. Linhas de Transmissão. 6. Compensação de Temperatura. I. Werneck, Marcelo Martins. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Elétrica. III. Título.

Dedicatória

Dedico este trabalho aos meus avós Pedro e Alzira, pois nunca faltou amor, carinho, incentivo, compreensão e companhia. Alcancei e tenho alcançado meus sonhos graças à vocês, obrigado.

Agradecimentos

Primeiramente agradeço a Deus pela benção da vida, saúde e paz. Como também pela capacitação, disposição e garra me presenteados para superar essa fase. Mesmo sem entender eu confio em Ti.

Aos meus avós Pedro e Alzira, sem vocês eu jamais teria conseguido.

A minha namorada, Bianca, pela compreensão, amor e incentivo.

Ao professor Marcos Tadeu D'Azeredo Orlando pela indicação, em 2014, à realização do mestrado no Laboratório de Instrumentação e Fotônica. Sei que fiz a escolha correta.

Ao professor Marcelo Martins Werneck pela oportunidade proporcionada de fazer parte da equipe e família do laboratório, podendo assim realizar o sonho de ser mestre em uma grande instituição. Seu auxílio e sugestões foram muito importantes. Que venha o doutorado!

Agradeço ao Fábio Vieira Batista de Nazaré pela sugestão do tema. Foi uma grande responsabilidade assumi-lo, mas graças a Deus e a você os objetivos foram alcançados. Muito obrigado!

Também agradeço à equipe de alunos, funcionários e colaboradores do Laboratório de Instrumentação e Fotônica, em especial ao Alex Dante pelas ideias e sugestões, as quais foram muito importantes para o sucesso deste trabalho. Não poderia deixar de comentar também o nome de Alexandre Silva Allil, que muito auxiliou em ensaios associados a esta dissertação.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

COMPENSAÇÃO DE TEMPERATURA PARA SENSORES DE CORRENTE ELÉTRICA BASEADOS EM REDES DE BRAGG EM FIBRAS ÓPTICAS

Leandro Alves Garção

Março/2017

Orientador: Marcelo Martins Werneck

Programa: Engenharia Elétrica

Neste trabalho propõe-se o estudo e o desenvolvimento da compensação de temperatura para sensores de corrente elétrica baseados em redes de Bragg em fibras ópticas utilizando a técnica de redes gêmeas. A medição de corrente elétrica por sensores optomagnéticos está muito bem descrita na literatura, bem como técnicas que tratam da compensação dos efeitos da variação térmica sobre o sinal de saída do sistema. Entretanto, a compensação via redes gêmeas empregando o método aqui aplicado ainda não foi relatada.

A compensação de temperatura em sistemas que empregam como elemento sensor a rede de Bragg faz-se necessária devido ao fato de variações de temperatura também induzirem alterações no comprimento de onda de Bragg, exercendo influência negativa sobre as características do sensor. Neste sentido, a compensação de temperatura foi alcançada com a adição de uma segunda rede de Bragg, denominada filtro fixo, a fim de interrogar o sinal proveniente da rede sensora. Estando fixadas em hastes de Terfenol-D próximas uma da outra e submetidas às mesmas variações de temperatura do interior de uma caixa de papel, obteve-se a separação dos efeitos de *strain* magnetostrictivo daqueles provenientes da temperatura no sinal de saída do sensor.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

TEMPERATURE COMPENSATION FOR ELECTRICAL CURRENT SENSORS
BASED ON FIBER BRAGG GRATINGS

Leandro Alves Garçon

March/2017

Advisor: Marcelo Martins Werneck

Department: Electrical Engineering

In this work it is proposed the study and the development of temperature compensation for electrical current sensors based on fiber Bragg gratings using the twin gratings technique. The measurement of electric current by opto-mechanical sensors is very well described in the literature, as well as techniques that propose the compensation of thermal variation effects on the output signal of the system. However, the compensation method employing twin gratings using the method proposed herein has not yet been reported in the literature.

The temperature compensation in systems that employ as sensor element the fiber Bragg grating is necessary due to the fact that temperature variations also induce changes in the Bragg wavelength, exerting negative influence on the characteristics of the sensor. In this sense, temperature compensation was achieved by the addition of a second fiber Bragg grating in the system, called fixed filter, in order to interrogate the output signal from the sensing grating. Once both gratings have been attached to the Terfenol-D rods close to each other and subjected to the same temperature variations inside a paper box, the separation of magnetostrictive strain from those related to temperature in the signal of sensor output could be obtained.

Sumário

| | |
|---|-----------|
| Lista de Figuras | x |
| Lista de Tabelas | xiv |
| Lista de Siglas..... | xv |
| Capítulo 1 Introdução | 1 |
| 1.1 Motivação | 1 |
| 1.2 Objetivos..... | 2 |
| 1.3 Organização | 2 |
| Capítulo 2 Fundamentos Teóricos | 3 |
| 2.1 Sensor | 3 |
| 2.2 Rede de Bragg | 3 |
| 2.3 Fotossensibilidade em Fibras Ópticas | 4 |
| 2.4 Técnicas de Gravação de Redes de Bragg..... | 5 |
| 2.4.1 Técnica de Gravação Interna | 5 |
| 2.4.2 Técnicas de Gravação Externa..... | 5 |
| 2.5 Materiais Magnetostrictivos | 6 |
| 2.6 Redes Gêmeas | 8 |
| Capítulo 3 Revisão Bibliográfica..... | 10 |
| 3.1 Sensores Ópticos de Corrente Elétrica e Tensão Baseados em Redes de Bragg em Fibras Ópticas | 11 |
| Capítulo 4 Metodologia..... | 21 |
| 4.1 Redes de Bragg em Fibra Óptica..... | 21 |
| 4.2 Terfenol-D | 23 |
| 4.3 Micrômetro e Fotopolimerizador LED..... | 23 |
| 4.4 Fonte de Luz | 25 |
| 4.5 Circulador Óptico | 25 |
| 4.6 Fotodetector-amplificador | 26 |
| 4.7 Osciloscópio | 27 |
| 4.8 Transformador de Corrente | 27 |
| 4.9 Transformador Variável | 27 |
| 4.10 Pinça de Corrente Elétrica | 28 |
| 4.11 Analisador de Espectro Óptico e Filtro Sintonizável de Fabry-Perot | 29 |
| 4.12 Interrogador Óptico | 30 |
| 4.13 Agitador Térmico | 30 |
| 4.14 Termômetro | 31 |
| 4.15 Haste de Terfenol-D Posicionada Paralelamente ao Condutor | 32 |
| 4.16 Cálculo do Coeficiente de Expansão Térmica das hastes de Terfenol-D..... | 33 |

| | | |
|--|---|-----------|
| 4.17 | Compensação de Temperatura..... | 34 |
| 4.18 | Linearidade | 36 |
| 4.19 | Transformada Rápida de <i>Fourier</i> e Distorção Harmônica Total..... | 36 |
| Capítulo 5 Resultados e Discussões..... | | 37 |
| 5.1 | Ensaio Preliminares | 37 |
| 5.2 | Haste de Terfenol-D Posicionada Paralelamente ao Condutor de Corrente Elétrica..... | 37 |
| 5.3 | Determinação do Comprimento de Onda da Rede de Bragg Filtro Fixo | 39 |
| 5.4 | Cálculo dos Coeficientes de Expansão Térmica das Hastes de Terfenol-D... .. | 40 |
| 5.5 | Ensaio com e sem Compensação de Temperatura | 45 |
| 5.5.1 | <i>Sem Compensação de Temperatura</i> | 45 |
| 5.5.2 | <i>Com Compensação de Temperatura</i> | 47 |
| 5.6 | Linearidade | 49 |
| 5.7 | Transformada Rápida de <i>Fourier</i> e Distorção Harmônica Total..... | 50 |
| Capítulo 6 Conclusões e Trabalhos Futuros | | 53 |
| 6.1 | Conclusões..... | 53 |
| 6.2 | Trabalhos Futuros | 54 |
| Referências Bibliográficas | | 55 |

Lista de Figuras

| | |
|---|----|
| Figura 2.1: Representação esquemática da orientação dos domínios magnéticos [17].... | 7 |
| Figura 2.2: <i>Strain</i> magnetostrictivo em função do campo magnético [17] | 7 |
| Figura 2.3: <i>Strain</i> magnetostrictivo para campos magnéticos simétricos [17]..... | 8 |
| Figura 2.4: Técnica de demodulação por redes gêmeas | 9 |
| Figura 3.1: Princípio de funcionamento dos sensores optomagnéticos de corrente elétrica [3] | 11 |
| Figura 3.2: Sensor optomagnético de corrente elétrica para linhas de transmissão [3].. | 11 |
| Figura 3.3: Região linear ou ponto quiescente [3]..... | 12 |
| Figura 3.4: Sensor óptico de corrente DC com compensação de temperatura baseado na força eletromagnética (adaptado de [23])..... | 13 |
| Figura 3.5: Sensor óptico de corrente elétrica AC e DC com compensação de temperatura (adaptado de [25])..... | 14 |
| Figura 3.6: Sensor óptico de corrente elétrica (adaptado de [26])..... | 14 |
| Figura 3.7: Sensor óptico de corrente DC com compensação de temperatura (adaptado de [28]) | 15 |
| Figura 3.8: Princípio de operação do sensor: a) Com ausência de campo magnético, b) Na presença de campo magnético, com o pico de reflexão da rede se dividindo [3] | 16 |
| Figura 3.9: Sensor de corrente elétrica AC e temperatura para linhas de transmissão (adaptado de [30])..... | 17 |
| Figura 3.10: Arranjo experimental do sensor de corrente elétrica AC e temperatura (adaptado de [31])..... | 17 |
| Figura 3.11: Técnica I de compensação da temperatura para sensor magnetostrictivo baseado em rede de Bragg (adaptado de [32]) | 18 |
| Figura 3.12: Técnica II de compensação da temperatura para sensor magnetostrictivo baseado em rede de Bragg (adaptado de [32]) | 19 |
| Figura 3.13: Sensor óptico para medição de tensões elétricas AC baseado em rede de Bragg e PZT [20]..... | 19 |
| Figura 3.14: Sensor óptico de tensão elétrica AC com compensação de temperatura (adaptado de [24])..... | 20 |
| Figura 4.1: Câmara de hidrogênio para incremento da fotossensibilidade da fibra óptica | 21 |
| Figura 4.2: Espectro óptico de reflexão da rede de Bragg sensora..... | 22 |

| | |
|---|----|
| Figura 4.3: Espectro óptico de reflexão da rede de Bragg filtro fixo | 22 |
| Figura 4.4: Dimensões das hastes de Terfenol-D [3] | 23 |
| Figura 4.5: Fotopolimerizador KaVo Poly 600 [36] | 24 |
| Figura 4.6: Posicionador mecânico com micrômetro segurando uma haste de Terfenol-D | 25 |
| Figura 4.7: Fonte de luz tipo ASE | 25 |
| Figura 4.8: Circulador óptico | 26 |
| Figura 4.9: Fotodetector-amplificador [38] | 26 |
| Figura 4.10: VARIAC I conectado aos TC's | 27 |
| Figura 4.11: VARIAC da JNG [40] | 28 |
| Figura 4.12: Pinça de corrente elétrica Fluke i2000 FLEX..... | 28 |
| Figura 4.13: Filtro sintonizável de Fabry-Perot da Oz Optics [42]..... | 29 |
| Figura 4.14: <i>Set-up</i> para sintonização do filtro de Fabry-Perot (adaptado de [3]) | 29 |
| Figura 4.15: Leitura do λ_B da rede de Bragg filtro fixo | 30 |
| Figura 4.16: Interrogador óptico da <i>Micron Optics</i> [43]..... | 30 |
| Figura 4.17: Termômetro Salvterm 120 | 31 |
| Figura 4.18: Termômetro da Extech [44] | 31 |
| Figura 4.19: Fotografia do ensaio do Terfenol-D posicionado paralelamente ao condutor de corrente | 32 |
| Figura 4.20: <i>Set-up</i> do ensaio do Terfenol-D posicionado paralelamente ao condutor de corrente | 32 |
| Figura 4.21: Direção da deformação da haste de Terfenol-D posicionada paralelamente ao condutor | 33 |
| Figura 4.22: <i>Set-up</i> do ensaio para o cálculo do CTE do Terfenol-D | 33 |
| Figura 4.23: Fotografia do ensaio para o cálculo do CTE do Terfenol-D..... | 34 |
| Figura 4.24: Ensaio sem compensação de temperatura..... | 34 |
| Figura 4.25: Ensaio com compensação de temperatura | 35 |
| Figura 4.26: Fotografia do arranjo experimental para os ensaios com e sem compensação de temperatura | 35 |
| Figura 4.27: Diagrama de blocos do Simulink para análise da THD para uma corrente elétrica de aproximadamente 200 A _{RMS} | 36 |
| Figura 5.1: Resposta do sensor optomagnético (em vermelho) e da pinça de corrente AC (sinal azul) para uma corrente elétrica de aproximadamente 20 A _{RMS} | 38 |

| | |
|---|----|
| Figura 5.2: Resposta do sensor optomagnético (em vermelho) e da pinça de corrente AC (sinal azul) para uma corrente elétrica de aproximadamente 100 A_{RMS} | 38 |
| Figura 5.3: Resposta do sensor optomagnético (em vermelho) e da pinça de corrente AC (sinal azul) para uma corrente elétrica de aproximadamente 200 A_{RMS} | 38 |
| Figura 5.4: Resposta do sensor optomagnético (em vermelho) e da pinça de corrente AC (sinal azul) para uma corrente elétrica de aproximadamente 400 A_{RMS} | 39 |
| Figura 5.5: Resposta do sensor optomagnético (em vermelho) e da pinça de corrente AC (sinal azul) para uma corrente elétrica de aproximadamente 600 A_{RMS} | 39 |
| Figura 5.6: Espectros das redes de Bragg gêmeas - filtro fixo em preto e sensora em azul | 40 |
| Figura 5.7: Comprimento de onda de Bragg x Temperatura – conjunto da rede de Bragg sensora | 41 |
| Figura 5.8: Comprimento de onda de Bragg x Temperatura – conjunto da rede de Bragg filtro fixo..... | 43 |
| Figura 5.9: Resposta do sensor optomagnético (em vermelho) e da pinça de corrente AC (sinal azul) para uma corrente elétrica de aproximadamente 320 A_{RMS} e temperatura de 31 °C | 45 |
| Figura 5.10: Resposta do sensor optomagnético (em vermelho) e da pinça de corrente AC (sinal azul) para uma corrente elétrica de aproximadamente 320 A_{RMS} e temperatura de 41,1 °C | 45 |
| Figura 5.11: Resposta do sensor optomagnético (em vermelho) e da pinça de corrente AC (sinal azul) para uma corrente elétrica de aproximadamente 320 A_{RMS} e temperatura de 48,4 °C | 46 |
| Figura 5.12: Resposta do sensor optomagnético (em vermelho) e da pinça de corrente AC (sinal azul) para uma corrente elétrica de aproximadamente 320 A_{RMS} e temperatura de 53,4 °C | 46 |
| Figura 5.13: Resposta do sensor optomagnético (em vermelho) e da pinça de corrente AC (sinal azul) para uma corrente elétrica de aproximadamente 320 A_{RMS} e temperatura de 55,4 °C | 46 |
| Figura 5.14: Resposta do sensor optomagnético (em vermelho) e da pinça de corrente AC (sinal azul) para uma corrente elétrica de aproximadamente 323 A_{RMS} e temperatura de 32,1 °C | 47 |

| | |
|--|----|
| Figura 5.15: Resposta do sensor optomagnético (em vermelho) e da pinça de corrente AC (sinal azul) para uma corrente elétrica de aproximadamente 323 A _{RMS} e temperatura de 33,6 °C | 47 |
| Figura 5.16: Resposta do sensor optomagnético (em vermelho) e da pinça de corrente AC (sinal azul) para uma corrente elétrica de aproximadamente 323 A _{RMS} e temperatura de 41,5 °C | 48 |
| Figura 5.17: Resposta do sensor optomagnético (em vermelho) e da pinça de corrente AC (sinal azul) para uma corrente elétrica de aproximadamente 323 A _{RMS} e temperatura de 49,8 °C | 48 |
| Figura 5.18: Resposta do sensor optomagnético (em vermelho) e da pinça de corrente AC (sinal azul) para uma corrente elétrica de aproximadamente 323 A _{RMS} e temperatura de 52,2 °C | 48 |
| Figura 5.19: Tensão de saída x Corrente elétrica – Linearidade | 50 |
| Figura 5.20: Amplitude das harmônicas em relação a fundamental x Harmônico..... | 50 |
| Figura 5.21: Resposta do sensor optomagnético para uma corrente elétrica de aproximadamente 800 A _{RMS} | 51 |

Lista de Tabelas

| | |
|--|----|
| Tabela 5.1: Variação do λ_B em função da elevação de temperatura – conjunto da rede de Bragg sensora | 40 |
| Tabela 5.2: Variação do λ_B em função da elevação de temperatura – conjunto da rede de Bragg filtro fixo | 42 |
| Tabela 5.3: Tensão de saída (RMS) x Corrente elétrica..... | 49 |
| Tabela 5.4: THD por corrente elétrica do sistema..... | 51 |

Lista de Siglas

AC – *Alternate Current*

ASE – *Amplified Spontaneous Emission*

COPPE – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia

CTE – *Coefficient of Thermal Expansion*

DC – *Direct Current*

FBG – *Fiber Bragg Grating*

FFT – *Fast Fourier Transform*

FWHM – *Full Width at Half Maximum*

LED – *Light Emission Diode*

LIF – Laboratório de Instrumentação e Fotônica

OSA – *Optical Spectrum Analyzer*

RMS – *Root Mean Square*

TC – Transformador de Corrente

THD – *Total Harmonic Distortion*

TP – Transformador de Potencial

VARIAC – Transformador Variável

UFRJ – Universidade Federal do Rio de Janeiro

UV – Ultravioleta

Capítulo 1

Introdução

1.1 Motivação

A medição de corrente e tensão elétrica é importante e necessária para diversos fins, em subestações e linhas de transmissão, por exemplo, é relevante para o correto monitoramento, tarifação e proteção de vidas e equipamentos. Essas medições são realizadas há mais de um século pelos transformadores para instrumentos convencionais, que dividem-se em: TC's (Transformadores de Corrente) e TP's (Transformadores de Potencial).

Além destes transformadores convencionais, há também, com tecnologia já consolidada e sendo comercializado no mercado por marcas como ABB e Areva, os transformadores ópticos para instrumentos. A utilização destes transformadores vem crescendo e tornando-os cada dia mais populares no setor elétrico, mas é importante ressaltar que esta não é uma tecnologia recente, medições de corrente elétrica por Efeito Faraday começaram a serem propostas durante a década de 1970 [1]. Já desde àquela época buscando-se usufruir das inúmeras vantagens intrínsecas à fibra óptica, como imunidade à interferência eletromagnética, baixo peso, estrutura compacta, alta sensibilidade e grande largura de banda [2].

Algumas das propostas de utilização desses equipamentos que vem crescendo nos últimos anos une sensores de corrente ópticos e materiais magnetostrictivos no processo de transdução. O arranjo físico é composto por uma rede de Bragg fixada a uma haste magnetostrictiva, por exemplo o Terfenol-D, e tem-se a informação acerca da corrente elétrica codificada no comprimento de onda de Bragg [3]. Entretanto, devido a rede de Bragg ser sensível tanto à variação de temperatura quanto à aplicação de tensões mecânicas externas (*strain*), quando não há compensação de temperatura, a leitura final que o sistema disponibiliza ao usuário também contempla efeitos da variação térmica do ambiente, o que influencia negativamente as características do sensor.

Daí a importância e motivação para o desenvolvimento deste trabalho, que consiste no estudo e desenvolvimento da compensação de temperatura para sensores de corrente elétrica baseados em redes de Bragg em fibras ópticas utilizando a técnica de

redes gêmeas. O projeto foi desenvolvido no LIF (Laboratório de Instrumentação e Fotônica), pertencente ao Programa de Engenharia Elétrica da COPPE/UFRJ.

1.2 Objetivos

Este trabalho objetiva alcançar e apresentar os seguintes resultados:

- Desenvolver a compensação de temperatura em sensores de corrente elétrica baseados em redes de Bragg em fibras ópticas;
- Implementar um processo superior de fixação da rede de Bragg à peça magnetostrictiva de modo a obter uma melhor fixação e concomitantemente aumento do tempo de vida útil do sensor.

1.3 Organização

Este trabalho está organizado em seis capítulos, mais uma seção de referências bibliográficas, os quais descrevem todas as etapas do projeto de pesquisa realizadas.

No capítulo 2 são apresentados os conceitos e fundamentos teóricos julgados importantes para o perfeito entendimento do trabalho. Por exemplo, as redes de Bragg, o fenômeno físico relacionado aos materiais magnetostrictivos e a técnica de demodulação por redes gêmeas.

Já no capítulo 3 é apresentada a revisão bibliográfica sobre os sensores ópticos com compensação de temperatura.

A metodologia que norteou e permitiu o desenvolvimento deste trabalho é apresentada no capítulo 4.

O capítulo 5 traz os resultados dos ensaios realizados no capítulo anterior, além da análise e discussão sobre cada um deles.

E finalmente, no capítulo 6 são apresentadas as conclusões e propostas para trabalhos futuros.

Capítulo 2

Fundamentos Teóricos

Neste capítulo serão apresentados os conceitos e fundamentos teóricos acerca principalmente de redes de Bragg, materiais magnetostrictivos e redes gêmeas.

2.1 Sensor

Um transdutor é um sistema que transforma duas formas de energia para fins de medida. Mede uma forma de energia que está relacionada a outra através de uma relação conhecida. Já o sensor, por outro lado, é apenas a parte sensitiva do transdutor [4].

2.2 Rede de Bragg

Uma rede de Bragg, também chamada FBG (*Fiber Bragg Grating*), é uma modulação periódica do índice de refração ao longo do comprimento da fibra que é formada pela exposição do núcleo a um padrão de interferência óptica intensa [5]. Essas modulações são perpendiculares ao eixo de propagação da luz e apresentam períodos menores que 1 μm [3].

Ela opera como um filtro espectral que seleciona e reflete uma determinada faixa de comprimentos de onda de um sinal luminoso de banda larga incidente, por exemplo por uma fonte de luz do tipo ASE (*Amplified Spontaneous Emission*). O comprimento de onda central do espectro de reflexão é chamado comprimento de onda de Bragg (λ_B) e o sinal de luz refletido satisfaz a condição de Bragg [6, 7]:

$$\lambda_B = 2 n_{\text{eff}} \Lambda \quad (2.1)$$

onde, n_{eff} é o índice de refração efetivo do núcleo da fibra e Λ é período de modulação do índice de refração.

O λ_B é sensível tanto à variação da temperatura do ambiente quanto por uma deformação longitudinal, ou *strain*, causado por uma força externa. Estas variações são descritas matematicamente como [6, 8]:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - \rho_e)\varepsilon_{\text{FBG}} + (\alpha_{\text{FBG}} + \eta)\Delta T \quad (2.2)$$

onde, $\Delta\lambda_B$ é a variação do comprimento de onda de Bragg, ρ_e o coeficiente foto-elástico, ε_{FBG} é o *strain* da rede de Bragg, α_{FBG} , que é igual a $0,55 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$, é o coeficiente de expansão térmica da sílica dopada com germânio, η o coeficiente termo-óptico e ΔT é a variação de temperatura.

O cálculo da sensibilidade de uma rede de Bragg pode ser realizado de forma independente para cada um dos seus parâmetros, *strain* e temperatura. Por exemplo, considerando que o λ_B não sofra os efeitos de *strain*, isto é, $\varepsilon_{\text{FBG}} = 0$, a Equação 2.2 se resumirá a:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (\alpha_{\text{FBG}} + \eta)\Delta T \quad (2.3)$$

Por outro lado, em um ambiente onde não há variação de temperatura, e, conseqüentemente o λ_B não sofra tais efeitos, ΔT será nulo e a Equação 2.2 resumirá agora a:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - \rho_e)\varepsilon_{\text{FBG}} \quad (2.4)$$

Assim, considerando uma rede de Bragg com $\lambda_B = 1550 \text{ nm}$ à temperatura de $25 ^\circ\text{C}$ e substituindo as constantes para fibras ópticas de sílica dopadas com germânio ($\rho_e = 0,22$ e $\eta = 8,6 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$) nas Equações 2.3 e 2.4, obtém-se os valores independentes para sensibilidade por temperatura e *strain*, respectivamente [9]:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\Delta T} = 14,18 \text{ pm}/^\circ\text{C} \quad (2.5)$$

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\varepsilon_{\text{FBG}}} = 1,21 \text{ pm}/\mu\varepsilon \quad (2.6)$$

2.3 Fotossensibilidade em Fibras Ópticas

A fotossensibilidade em fibras ópticas foi primeiramente demonstrada por Hill *et al.* em 1978 no Centro Canadense de Pesquisas em Comunicações (CRC) [10]. Eles lançaram uma intensa radiação de laser de íon argônio em uma fibra óptica de sílica dopada com germânio e observaram que, após alguns minutos, ocorreu um aumento na intensidade da luz refletida que cresceu até quase toda a luz ser refletida da fibra. Essa conquista, posteriormente chamada de "Hill gratings", foi uma consequência da pesquisa sobre as propriedades não-lineares da fibra de sílica dopada com germânio [5]. Essa pesquisa propiciou uma nova tecnologia de sensoriamento e avanços em diversas áreas.

2.4 Técnicas de Gravação de Redes de Bragg

Para fabricação de sensores baseados em redes de Bragg há dois tipos de técnicas de gravações disponíveis: internas e externas. As externas dividem-se em técnicas por interferometria, método da máscara de fase e técnica ponto a ponto [11, 12].

2.4.1 Técnica de Gravação Interna

Essa técnica, não muito utilizada, que contribuiu para a descoberta da rede de Bragg, foi primeiramente demonstrada em 1978 por HILL *et al.* [10]. As redes de Bragg gravadas através desta técnica têm a limitação de só operarem no comprimento de onda de excitação do laser de gravação e, devido à pequena variação do índice de refração induzida por este método, refletividades úteis só podem ser alcançadas em redes de Bragg longas com dezenas de centímetros de comprimento [11].

2.4.2 Técnicas de Gravação Externa

- Técnica por Interferometria

Também conhecida como método holográfico transversal, essa técnica proposta por MELTZ *et al.* [13] suplantou a de gravação interna em 1989 e consiste na modulação espacial de intensidade da luz UV (Ultravioleta) através da interferência de dois feixes coerentes. Para essa técnica é necessária uma fonte UV com coerência temporal e espacial, tais que tornem possível a construção de um interferômetro. As características da rede de Bragg gravada estão fortemente relacionadas com as características da fonte de luz [14].

- Método da Máscara de Fase

Essa é uma das técnicas mais importantes e eficientes de inscrição de redes de Bragg em fibras ópticas fotossensíveis. Este método emprega um elemento de difração óptica, a máscara de fase, para modular espacialmente o feixe de escrita UV e produzir um padrão de interferência no núcleo da fibra óptica, formando uma rede de Bragg [11].

A fim de se incrementar a fotossensibilidade, BARBOSA *et al.* [15] sugerem manter a fibra óptica em um tubo de cobre hermeticamente fechado com hidrogênio de alta pureza e pressão aproximada de 120 psi durante o período de uma semana. Os autores obtiveram uma refletividade de 76 % nas redes de Bragg fabricadas por este método após hidrogenação das fibras ópticas.

Segundo NAZARÉ [3], com a hidrogenação, há a difusão de moléculas de hidrogênio para o núcleo da fibra; o hidrogênio difundido evita uma relaxação estrutural

dos defeitos induzidos pela exposição ao UV, o que aumenta a irreversibilidade espontânea das mudanças estruturais e conseqüentemente a mudança induzida no índice de refração.

- Técnica Ponto a Ponto

Essa técnica consiste em induzir uma alteração no índice de refração correspondente a um plano de grade a um passo de cada vez ao longo do núcleo da fibra óptica. Num arranjo experimental típico um único impulso de luz UV passa através de uma máscara contendo uma ranhura e o índice de refração do núcleo na seção da fibra irradiada é alterado localmente. Um único plano de difração da grade de Bragg é então obtido e faz-se necessário repetir o processo até a formação de uma estrutura de grades. Portanto, essa técnica revela-se um processo tedioso e requer relativamente um longo processo de tempo para conclusão [11].

2.5 Materiais Magnetostrictivos

Descoberta em 1842 por Joule [16], a magnetostricção pode ser descrita, em geral, como a deformação de um corpo em resposta a uma mudança em sua magnetização (momento magnético por unidade de volume). Essa mudança na magnetização pode ser provocada por uma alteração de temperatura ou pela aplicação de um campo magnético. Todos os materiais magnéticos exibem magnetostricção em algum grau. Entretanto, a magnetostricção gigante ocorre em um pequeno número de materiais contendo elementos de terras raras, como por exemplo o Terfenol-D.

O magnetismo ocorre devido a um desequilíbrio incomum nos momentos magnéticos dos elétrons em um material. Quando esse desequilíbrio ocorre, os elétrons podem se ordenar de tal forma que o momento magnético total esteja em uma determinada direção, produzindo assim novas propriedades, uma delas a magnetostricção [16].

Uma representação esquemática da mudança de orientação dos elétrons na presença de um campo magnético externo é apresentada na Figura 2.1, sendo que cada estágio tratado é discriminado na Figura 2.2. Na região entre 0 e 1, onde o campo magnético aplicado é pequeno, os domínios magnéticos praticamente não apresentam um padrão de orientação comum ou apresentam um padrão muito pequeno. Na região entre 1 e 2 há uma relação quase linear entre a deformação e o campo magnético. Devido à simples relação, é fácil prever o comportamento do material e a maioria dos dispositivos são projetados para operar nesta região. A partir do ponto 2 a relação entre o campo

magnético e a deformação torna-se novamente não-linear devido ao fato da maior parte dos domínios magnéticos estarem alinhados com a direção do campo magnético. Já no ponto 3 existe o efeito da saturação, que impede o alongamento do material [17].

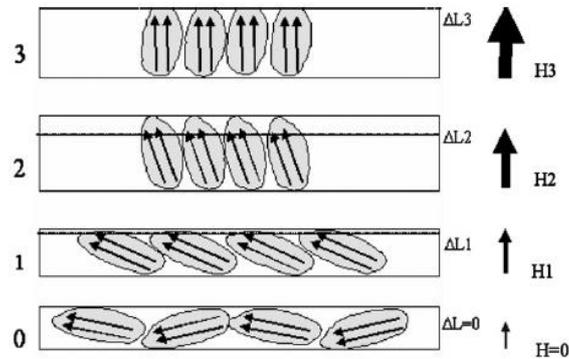


Figura 2.1: Representação esquemática da orientação dos domínios magnéticos [17]

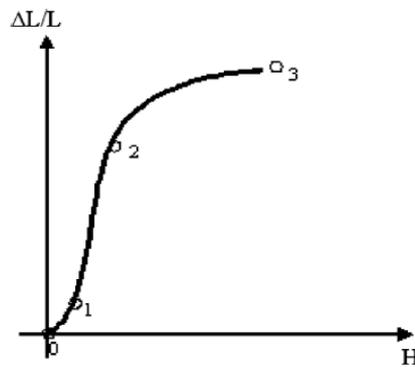


Figura 2.2: *Strain* magnetostricção em função do campo magnético [17]

O Efeito Joule é o mais conhecido em relação à magnetostricção, engloba tanto a magnetostricção positiva, quando há expansão do material, quanto a negativa, quando há contração [17]. O Terfenol-D, que está contemplado neste trabalho, possui magnetostricção positiva, já o Níquel, por exemplo, que foi utilizado nos experimentos iniciais em NAZARÉ [3], possui magnetostricção negativa. Sendo assim, podemos ressaltar que o λ_B em um transdutor baseado em Níquel decrescerá à medida que o campo magnético aumentar e, ao contrário, para os transdutores baseados em Terfenol-D aumentará. Abaixo, na Figura 2.3, é apresentado o comportamento idealizado da mudança de comprimento do material em resposta ao campo magnético AC (*Alternate Current*) aplicado, comportamento este similar ao que espera-se neste trabalho.

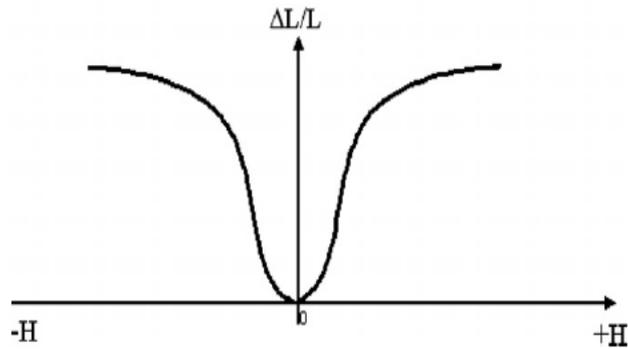


Figura 2.3: *Strain* magnetostrictivo para campos magnéticos simétricos [17]

É possível observar que em um campo magnético negativo, um *strain* com o mesmo sinal que seria obtido com um campo magnético positivo é alcançado, mostrando que campos magnéticos simétricos provocam o mesmo tipo de deformação.

O Terfenol-D é um material magnetostrictivo composto por terras raras, prateado, frágil na temperatura ambiente e de difícil fabricação, denominado assim a partir dos elementos que o compõem: “Ter” - Térbio, “Fe” - Ferro, “NOL” - *Naval Ordnance Laboratory* e “D” – Disprósio [18]. Uma de suas principais características, ao menos para este trabalho, é o valor do seu CTE (*Coefficient of Thermal Expansion*), que possui o valor de $12 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ [17, 18]. Pois uma vez que duas hastes serão alocadas próximas uma à outra, uma fixada à rede de Bragg sensora e outra a filtro fixo, há a necessidade de possuírem o mesmo valor ou próximos a fim de se obter a compensação de temperatura. O ensaio de calibração do Terfenol-D será descrito e apresentado na seção 4.16. Todas as peças de Terfenol-D foram adquiridas junto à empresa ETREMA Products, Inc. (Ames, Iowa).

2.6 Redes Gêmeas

É uma técnica de demodulação que consiste no acréscimo de uma segunda rede de Bragg, chamada filtro fixo, de modo que esta funcione como um filtro espectral para a demodulação de uma rede de Bragg sensora [19]. Enquanto o λ_B da rede sensora sofre as variações dos parâmetros sob medida (térmica, deformação, vibração, etc.), o outro se mantém fixo permitindo a interrogação da resposta espectral do sensor. O sinal de saída dessa técnica é a convolução (operador matemático que a partir da interação entre duas funções produz uma terceira) dos espectros de reflexão da rede de Bragg sensora e filtro fixo. Um *set-up* comumente utilizado na demodulação por redes gêmeas é apresentado na Figura 2.4.

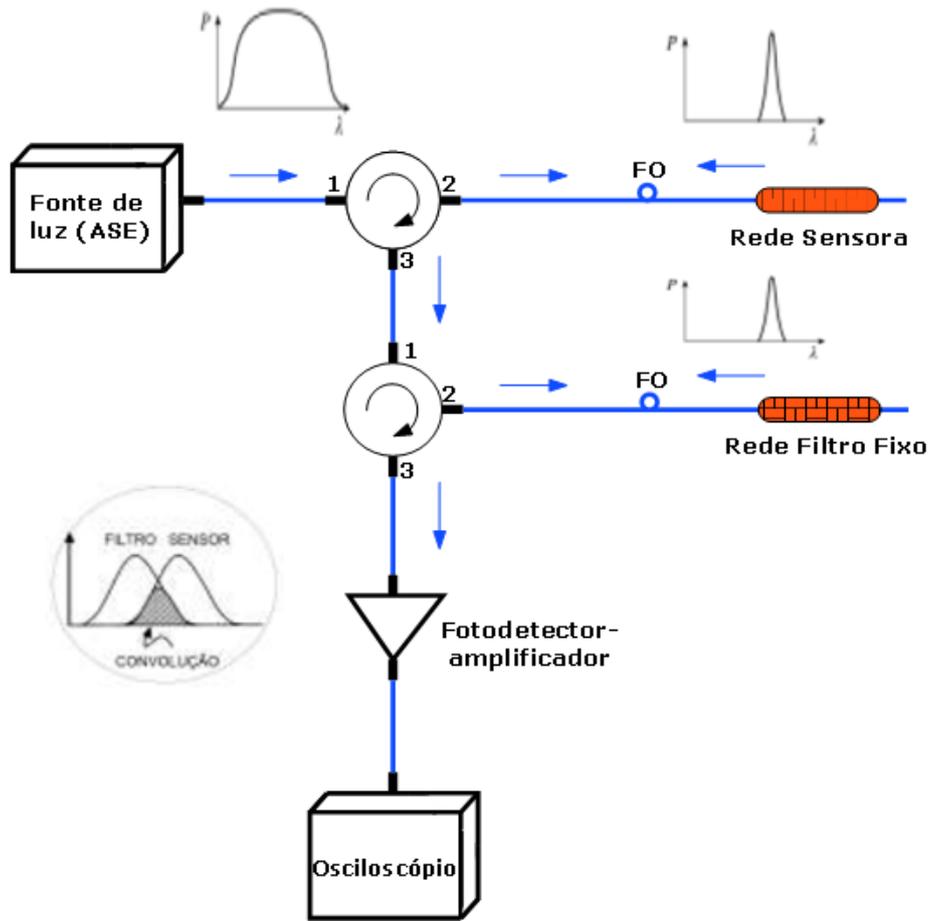


Figura 2.4: Técnica de demodulação por redes gêmeas

Capítulo 3

Revisão Bibliográfica

Embora há mais de um século os transformadores para instrumentos convencionais desempenham as funções de medição de corrente e tensão elétrica, estes equipamentos apresentam muitos problemas, por exemplo: são pesados, visto que são constituídos de cobre, cerâmica e ferro, dificultando inclusive sua manutenção; possuem limitações quanto à linearidade, resposta harmônica, resposta transitória, saturação do núcleo, segurança, precisão, entre outros problemas [20].

Estes problemas estimularam alguns pesquisadores a buscar novas tecnologias para medição de corrente ou tensão elétrica. Como consequência, surgem nos anos 1970 os transformadores de instrumentos ópticos [21], os quais possuem várias vantagens em relação aos convencionais, por exemplo: peso reduzido, melhor precisão na medição, ausência de óleo isolante e eliminação da saturação [22]. Nesses quase 50 anos já foram empregadas diversas técnicas ópticas que traziam a promessa de vantagens comerciais e de desempenho quando comparados aos convencionais métodos de medição e proteção em sistemas elétricos de geração e distribuição de energia. Tais técnicas, ainda em uso, baseiam-se na interação de campos elétricos e magnéticos com diversos materiais através dos efeitos Faraday, Kerr e Pockels [20].

Com a descoberta da fotossensibilidade em fibras ópticas surgiu uma nova alternativa na área de sensoriamento óptico. Os sensores baseados em redes de Bragg são capazes de medir diversos parâmetros, desde temperatura, *strain*, vibração, pressão e aceleração. Já foram relatadas muitas aplicações bem sucedidas em campos que incluem engenharia aeroespacial, civil e marítima, bem como no sistema elétrico de potência, os quais exploram os benefícios intrínsecos de sensores a fibra óptica, tais como imunidade à interferência eletromagnética, isolamento elétrico, alta confiabilidade, entre outros [23].

Embora possua todas as vantagens citadas acima, a tecnologia de sensores ópticos ainda representa um nicho de mercado. Para LIMA [22], as principais razões baseiam-se na dificuldade de integração com os sistemas de medição e controle existentes nas subestações, como também superar a barreira cultural de aceitação de novas tecnologias. Já para FUSIEK e NIEWCZAS [24], a principal causa é o custo elevado dos sistemas de medição óptica existentes em comparação com os equivalentes convencionais.

3.1 Sensores Ópticos de Corrente Elétrica e Tensão Baseados em Redes de Bragg em Fibras Ópticas

A seguir serão apresentados alguns exemplos de sensores ópticos de corrente e tensão elétrica baseados em redes de Bragg em fibras ópticas encontrados na literatura. Todos os sensores de corrente elétrica, independente da estrutura do sistema, funcionam a partir do mesmo princípio apresentado na Figura 3.1, ou seja, um campo magnético externo gerado por uma corrente elétrica induz uma deformação no material magnetostrictivo e concomitantemente, a rede de Bragg a ele fixada também sofre uma variação no seu λ_B . Por fim, tem-se uma informação acerca da corrente elétrica codificada no λ_B [3].

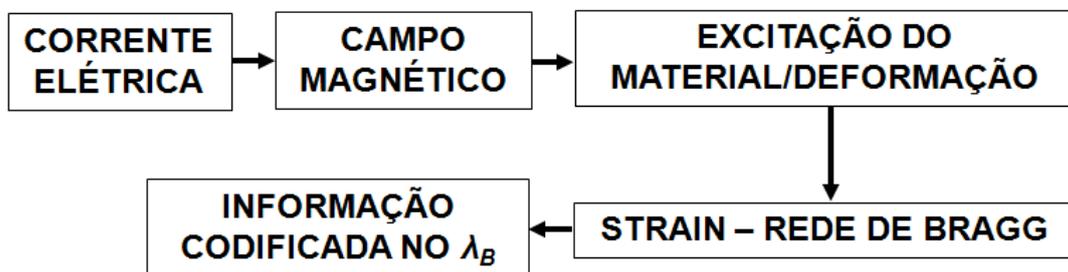


Figura 3.1: Princípio de funcionamento dos sensores optomagnéticos de corrente elétrica [3]

Partindo deste princípio, na proposta implementada por NAZARÉ [3], o autor reporta um sensor optomagnético de corrente elétrica para linhas de transmissão compacto e prático, o qual é capaz de recuperar a senóide completa do sinal de corrente que está sendo conduzido pela linha através de um arranjo que é excitado por campos magnéticos DC (*Direct Current*) e AC, conforme Figura 3.2.

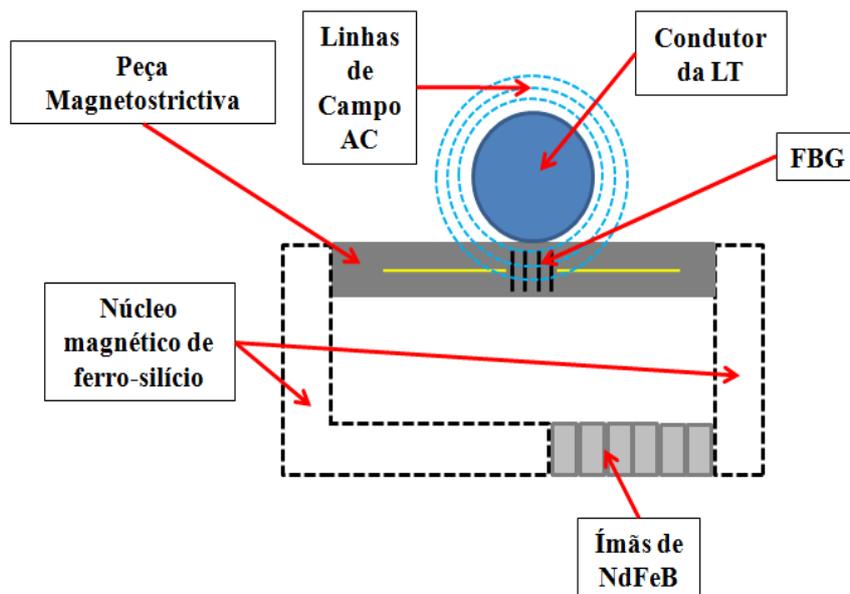


Figura 3.2: Sensor optomagnético de corrente elétrica para linhas de transmissão [3]

Os ímãs de neodímio-ferro-boro (NdFeB) foram alocados entre as duas barras que compõem o núcleo magnético de ferro-silício para fornecerem a magnetização DC ou polarização permanente necessária para que o Terfenol-D operasse em sua região linear ou ponto quiescente (região onde a inclinação possui valor máximo, Figura 3.3) e, assim, permitisse que uma forma de onda AC senoidal fosse reproduzida. A intensidade de campo magnético calculada pelo autor para que o sensor operasse de maneira otimizada foi de 82 kA/m.

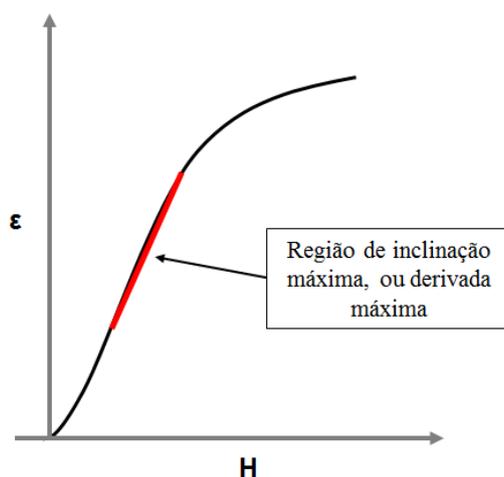


Figura 3.3: Região linear ou ponto quiescente [3]

Este sensor também foi desenvolvido no LIF, entretanto, não objetivou e contemplou a compensação de temperatura, mas graças aos avanços acadêmicos e ótimos resultados obtidos, serviu de base para o desenvolvimento deste trabalho.

Já YAO *et al.* [23] desenvolveram um sensor de corrente DC com compensação de temperatura intrínseca baseado na força eletromagnética para medições de até 500 A. O sistema consiste em um ferro móvel, outro estático, um cantilever, duas redes de Bragg fixadas em lados opostos do cantilever e uma placa de alumínio, todos instalados no interior de uma solenóide, Figura 3.4. O princípio de funcionamento consiste em: quando uma corrente elétrica contínua flui através da solenóide, um campo magnético uniforme é produzido e magnetiza os ferros móvel e estático. Como possuem campos magnéticos com polaridades diferentes, isso produzirá uma força de atração eletromagnética entre eles e serão atraídos um para o outro, gerando uma deflexão no cantilever e *strains* opostos nas duas redes de Bragg. Ainda, como as duas redes de Bragg estão fixadas próximas uma da outra, alterações em seus λ_B devido à temperatura são consideradas idênticas, mas em relação ao *strain*, terão direções opostas, com os mesmos valores absolutos. Com base no método de medição diferencial e estrutura projetada, os λ_B das

redes nomeadas como FBG1 e FBG2 moverão, respectivamente, para direções de comprimento de onda mais longa e mais curta.

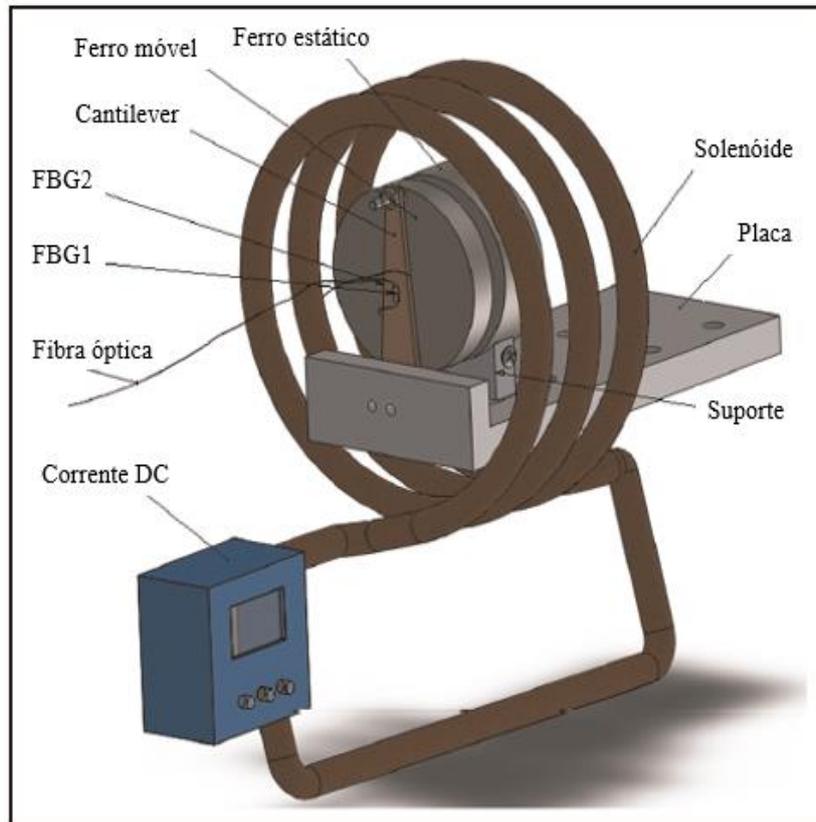


Figura 3.4: Sensor óptico de corrente DC com compensação de temperatura baseado na força eletromagnética (adaptado de [23])

Em ZHAO *et al.* [25] os autores apresentaram um sensor capaz de medir correntes elétricas AC e DC com compensação de temperatura, Figura 3.5. Similar a este trabalho de dissertação, os autores empregaram duas redes de Bragg fixadas em duas ligas magnetostrictivas gigantes, o Terfenol-D, mas com o mesmo λ_B inicial (1550,43 nm a 20 °C). Os dois conjuntos, compostos por rede de Bragg + Terfenol-D, foram alocados em contato com campos magnéticos de polarização de mesma intensidade, mas opostos, de modo que enquanto uma rede de Bragg sofre alongamento elástico, a outra sofre encurtamento, com isso as duas redes deslocam-se separadamente para λ_B mais longos e mais curtos, respectivamente. A variação da temperatura tem a mesma influência em ambas redes de Bragg, sendo assim, seus efeitos foram removidos absolutamente medindo a diferença entre os λ_B .

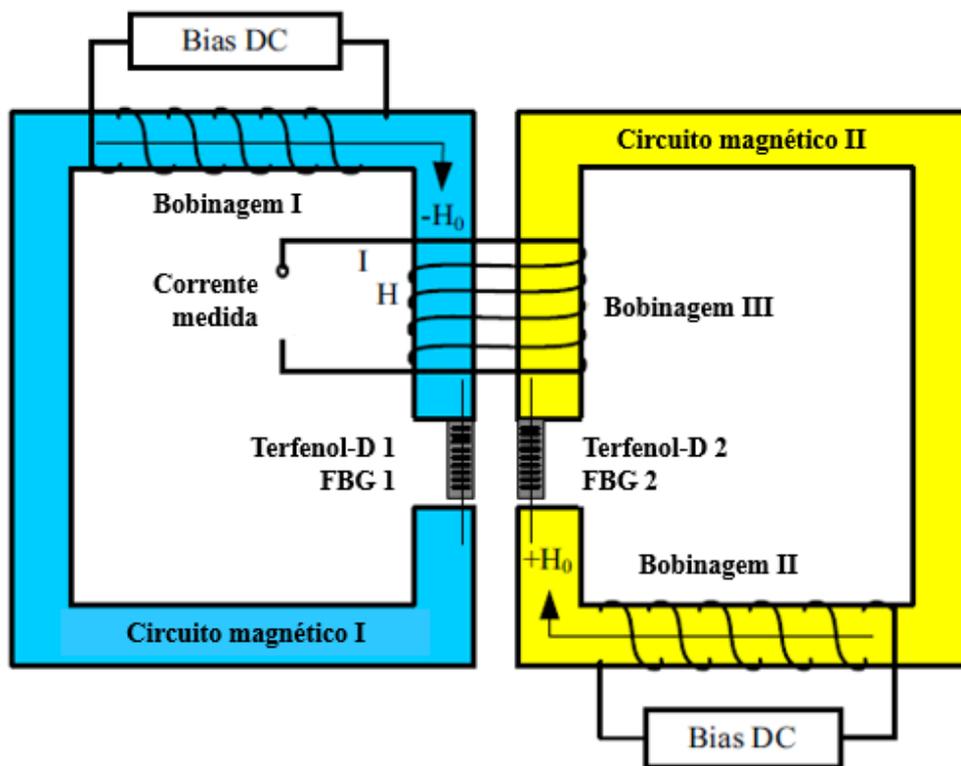


Figura 3.5: Sensor óptico de corrente elétrica AC e DC com compensação de temperatura (adaptado de [25])

Por sua vez, em CREMONEZI *et al.* [26] os autores desenvolveram um sensor optomagnético de corrente RMS (*Root Mean Square*) apresentando uma técnica inovadora de utilização de um material magnostriectivo de forma toroidal, Figura 3.6. O protótipo foi testado na faixa de 180 a 900 A e apresentou boa linearidade, especialmente na faixa de corrente de 320 a 900 A, onde o erro calculado foi inferior a 0,6 %.

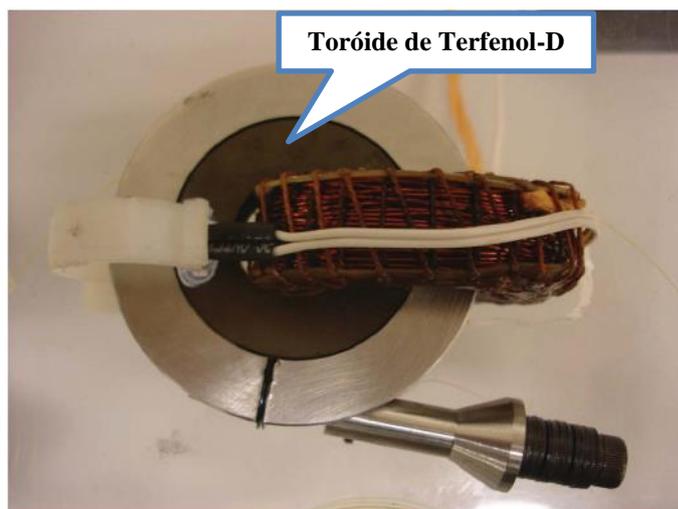


Figura 3.6: Sensor óptico de corrente elétrica (adaptado de [26])

Em DIAS *et al.* [27] foi desenvolvido um sistema de interrogação baseado em redes de Bragg eficaz, simples e de baixo custo para medições AC. Uma fonte de luz tipo

laser foi empregada para incidir um feixe de luz com comprimento de onda central em 1551 nm em um par de redes de Bragg correspondentes (sensora e referência, FBG1 e FBG2, respectivamente). Além disso, os autores implementaram um circuito eletrônico que além de medir o deslocamento do λ_B devido à variações de temperatura na FBG2, atua proporcionalmente na temperatura da fonte de luz para induzir mudanças no seu comprimento de onda, compensando assim os efeitos da temperatura na FBG1.

MORA *et al.* [28] desenvolveram um sistema capaz de medir correntes elétricas DC com compensação de temperatura utilizando um simples método: há duas ligas (Terfenol-D e Monel400 – liga de níquel, cobre e ferro) conectadas, uma magnetostrictiva e a outra não, que possuem o mesmo CTE e encontram-se em equilíbrio térmico. A liga Monel400 funciona como referência da primeira para variações de temperatura no ambiente. Em cada uma das ligas há uma rede Bragg fixada, ambas inscritas no mesmo enlace óptico, conforme Figura 3.7.

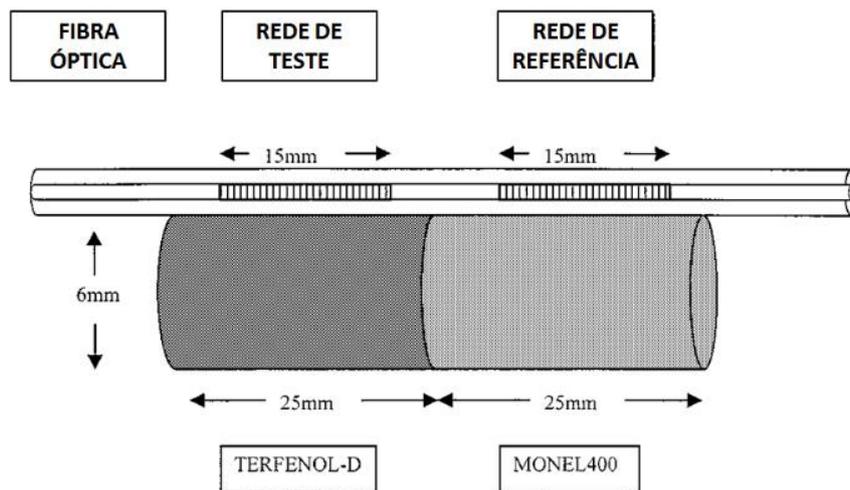


Figura 3.7: Sensor óptico de corrente DC com compensação de temperatura (adaptado de [28])

Uma vez que o Terfenol-D é submetido a um campo magnético externo, ele sofrerá uma magnetostricção positiva e seu comprimento será alterado, como também da rede de Bragg a ele fixada. Já o Monel400, que não é magnético, e a segunda rede de Bragg, sofrerão apenas os efeitos da variação de temperatura no ambiente. Portanto, a diferença entre os λ_B refletidos pelas redes na saída do sistema é uma medida da magnetostricção e temperatura, respectivamente.

CHIANG *et al.* [29] propõem um sensor de correntes elétricas DC e AC simples, porém engenhoso. Tal qual MORA *et al.* [28], também são empregadas as ligas de Terfenol-D e Monel400 para compensação de temperatura, mas com apenas uma rede de Bragg fixada metade no Terfenol-D e a outra metade no Monel400, conforme Figura 3.8.

Na presença de campo magnético externo as duas ligas sofrem alterações diferentes em suas dimensões, o que causa uma divisão no espectro de reflexão da rede de Bragg e consequentemente a compensação da temperatura.

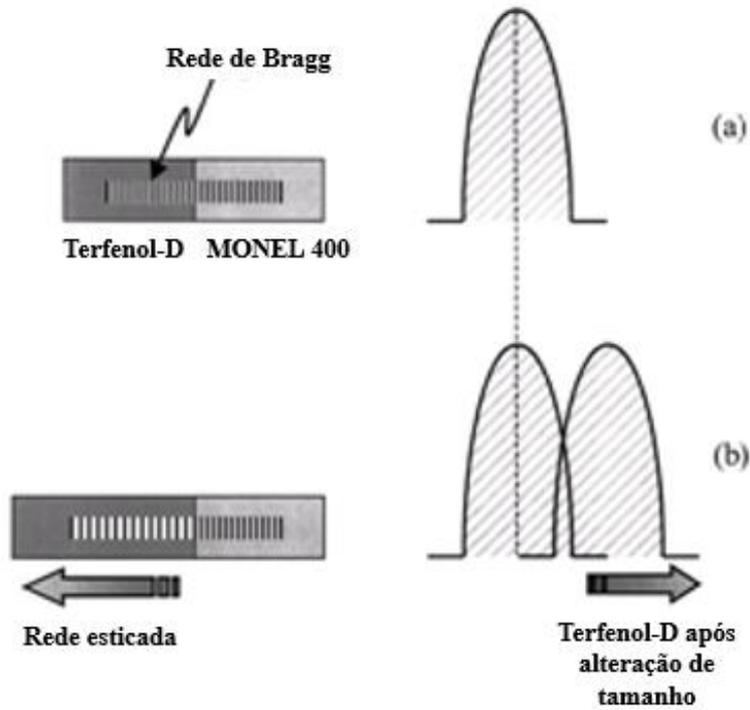


Figura 3.8: Princípio de operação do sensor: a) Com ausência de campo magnético, b) Na presença de campo magnético, com o pico de reflexão da rede se dividindo [3]

Em MORA *et al.* [30] os autores apresentaram um sensor optomagnético baseado em rede de Bragg para medição simultânea de correntes AC e temperatura em linhas de alta tensão. Conforme Figura 3.9, uma haste magnetostrictiva foi alocada a uma distância D do centro do cabo condutor de corrente elétrica, distância necessária para que a haste interaja com as linhas de campo magnético AC e sofra o Efeito Joule. Concomitantemente foi projetado um contato térmico entre o condutor e o material magnetostrictivo com o propósito de medição da temperatura. O sinal refletido pela rede de Bragg incide sobre um fotodiodo e o sinal elétrico $V(t)$ é medido por um analisador de espectro elétrico, possibilitando que o sistema realize tanto medições de corrente quanto temperatura, o primeiro parâmetro codificado em amplitude e o segundo no comprimento de onda.

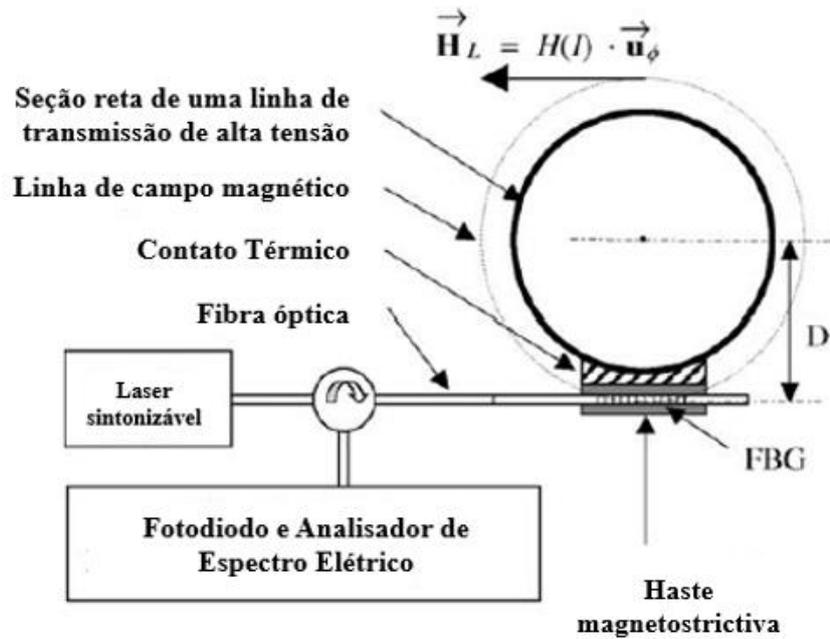


Figura 3.9: Sensor de corrente elétrica AC e temperatura para linhas de transmissão (adaptado de [30])

Um sistema para medição simultânea de corrente elétrica AC e temperatura foi desenvolvido em REILLY *et al.* [31]. Os autores fixaram uma rede de Bragg ao material magnetostrictivo e alocaram ímãs próximos ao conjunto a fim de que ele operasse em seu ponto quiescente. O sinal de excitação do sensor provém da bobina construída com fios de cobre e a medição de temperatura é possível graças à identificação do comprimento de onda do ponto quiescente do sensor, pois à medida que a temperatura aumenta o comprimento de onda deste ponto também aumentará. A Figura 3.10 apresenta o sensor desenvolvido.

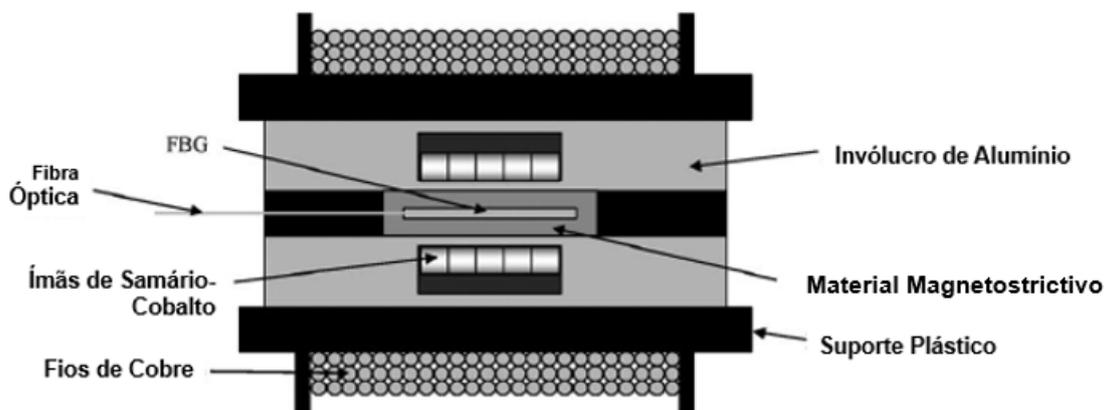


Figura 3.10: Arranjo experimental do sensor de corrente elétrica AC e temperatura (adaptado de [31])

Já YI *et al.* [32] apresentaram duas técnicas simples para compensação dos efeitos da temperatura em um sensor magnetostrictivo baseado em rede de Bragg. Na primeira técnica, Figura 3.11, duas redes de Bragg com λ_B quase idênticos e perpendiculares uma

a outra são fixadas à superfície de uma placa de Terfenol-D de forma quadrada. Um campo magnético é gerado por uma bobina de corrente contínua e aplicado à placa Terfenol-D, como resultado, os λ_B das duas redes se afastam em direções opostas ao mesmo tempo que a temperatura do sensor é alterada devido à dissipação de calor da bobina de corrente. Estando as duas redes de Bragg em equilíbrio térmico, a variação de temperatura no ambiente desloca os λ_B com a mesma intensidade, tornando o sensor insensível aos efeitos da temperatura e proporcionando uma medição precisa do efeito magnetostrictivo.

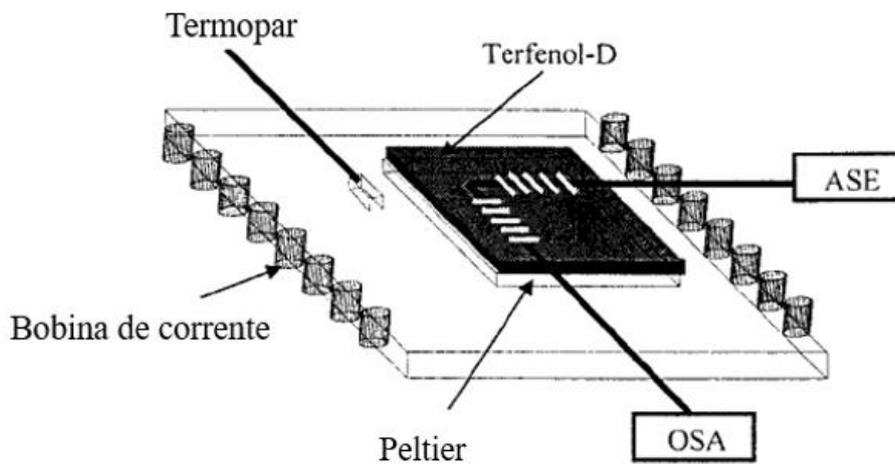


Figura 3.11: Técnica I de compensação da temperatura para sensor magnetostrictivo baseado em rede de Bragg (adaptado de [32])

Na segunda técnica, Figura 3.12, os autores também utilizaram duas redes de Bragg, mas diferentemente da anterior, nesta técnica uma rede de Bragg foi fixada em uma barra de Terfenol-D e a outra em uma de Níquel de mesmo tamanho, alocadas em paralelo com a direção do campo magnético. Como o Terfenol-D e o Níquel possuem CTE próximos ($12 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ e $13 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ [33], respectivamente), mas coeficientes magnetostrictivos de sinais opostos, a diferença dos λ_B é uma medida da soma dos efeitos magnetostrictivos do Terfenol-D e do Níquel.

Os autores concluem o trabalho afirmando que através das duas técnicas foi possível reduzir a sensibilidade do sensor à temperatura em mais de 10 vezes.

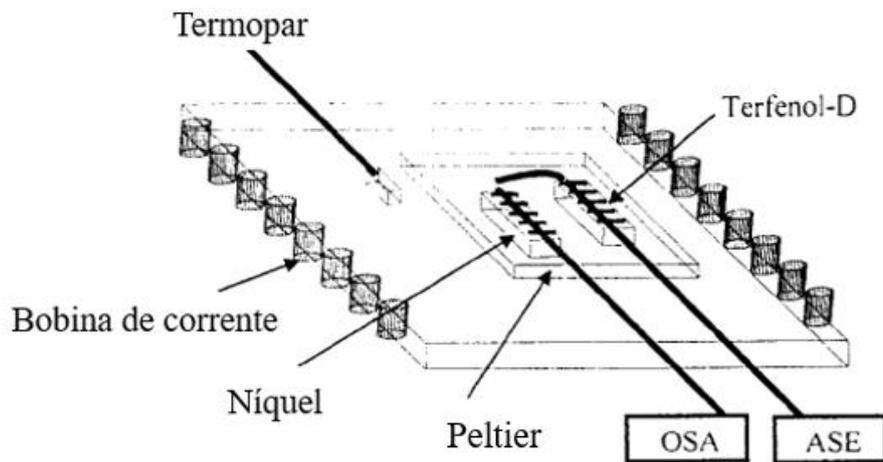


Figura 3.12: Técnica II de compensação da temperatura para sensor magnetostrictivo baseado em rede de Bragg (adaptado de [32])

DANTE [34] desenvolveu um módulo sensor óptico para medição de tensões superiores a 10 kV AC baseado em rede de Bragg e cerâmicas piezoelétricas com um divisor capacitivo. O divisor capacitivo é constituído de atuadores piezoelétricos de cerâmica PZT que promovem a transdução do campo elétrico aplicado em deformações mecânicas, *strain*, que atuam diretamente sobre a rede de Bragg sensora. Ainda, utilizando duas redes de Bragg gêmeas, sensora e sintonizável, as variações de temperatura foram compensadas automaticamente através do controle do nível de convolução do sinal de saída do sistema através da eletrônica apresentada na Figura 3.13.

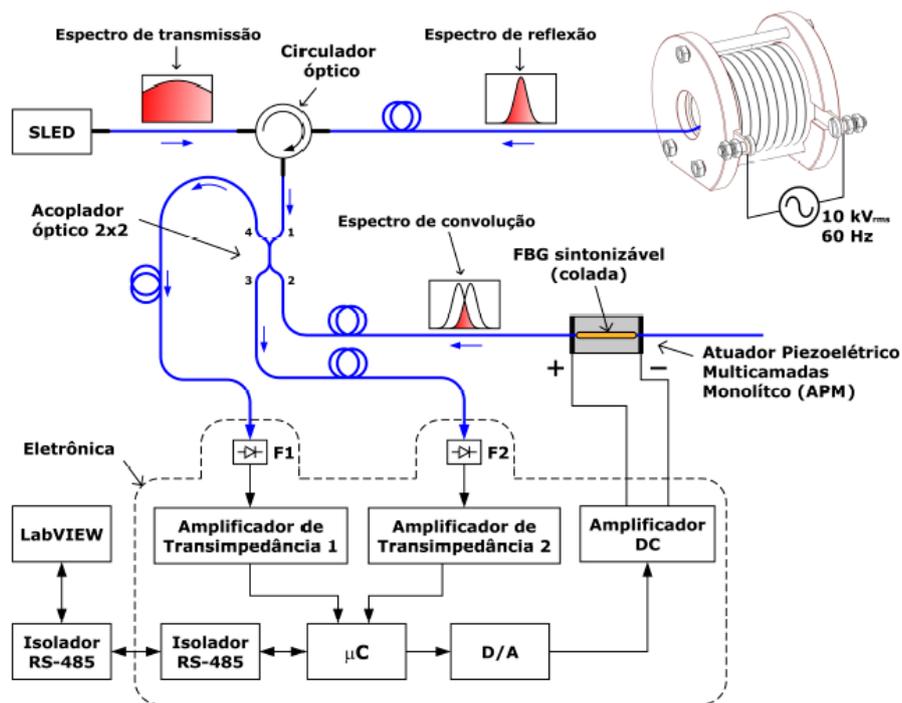


Figura 3.13: Sensor óptico para medição de tensões elétricas AC baseado em rede de Bragg e PZT [20]

FUSIEK e NIEWCZAS [24] apresentaram, com apenas uma rede de Bragg fixada em uma pilha de seis cerâmicas piezoelétricas, um sensor de tensão capaz de realizar medições AC e compensar a temperatura, conforme Figura 3.14. A rede de Bragg foi fixada uniformemente na pilha piezoelétrica, sendo metade sobreposta às três primeiras cerâmicas piezoelétricas, utilizadas como transdutor de tensão elétrica em *strain*, e a outra metade sobre as cerâmicas restantes, responsáveis pela compensação de temperatura. Devido ao processo de fixação empregado, a reflexão da rede de Bragg fornece dois espectros, mantidos parcialmente sobrepostos e em equilíbrio térmico. Conseqüentemente, qualquer alteração da temperatura causa uma mudança de mesma intensidade no λ_B dos espectros de reflexão, permitindo assim medições confiáveis e independentes da temperatura.

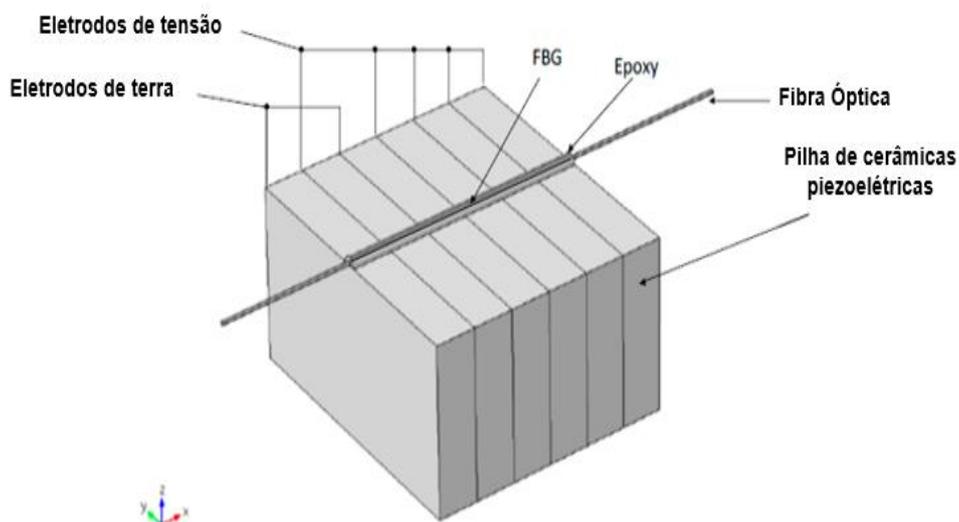


Figura 3.14: Sensor óptico de tensão elétrica AC com compensação de temperatura (adaptado de [24])

RIBEIRO [19] desenvolveu um sensor óptico-elétrico capaz de medir e monitorar a tensão em linhas de transmissão com compensação de temperatura intrínseca. Assim como em DANTE [20] e FUSIEK e NIEWCZAS [24], foram empregadas cerâmicas piezoelétricas atuando como um transdutor de tensão e uma rede de Bragg como sensor de deslocamento.

Capítulo 4

Metodologia

Neste capítulo são apresentados os equipamentos e materiais, suas principais características e os *set-up* empregados para alcançar os objetivos do trabalho.

4.1 Redes de Bragg em Fibra Óptica

Duas redes de Bragg com λ_B de 1535,48 e 1535 nm foram empregadas neste trabalho. Essas redes foram inscritas no LIF e desempenharam as funções de rede sensora e filtro fixo, respectivamente. Para aumento da fotossensibilidade, a fibra óptica que as originou foi previamente mantida em uma câmara de hidrogênio, Figura 4.1, por oito dias a uma pressão de 96,78 atm (100 kgf/cm²). Os espectros de reflexão das redes de Bragg são apresentados nas Figuras 4.2 e 4.3.

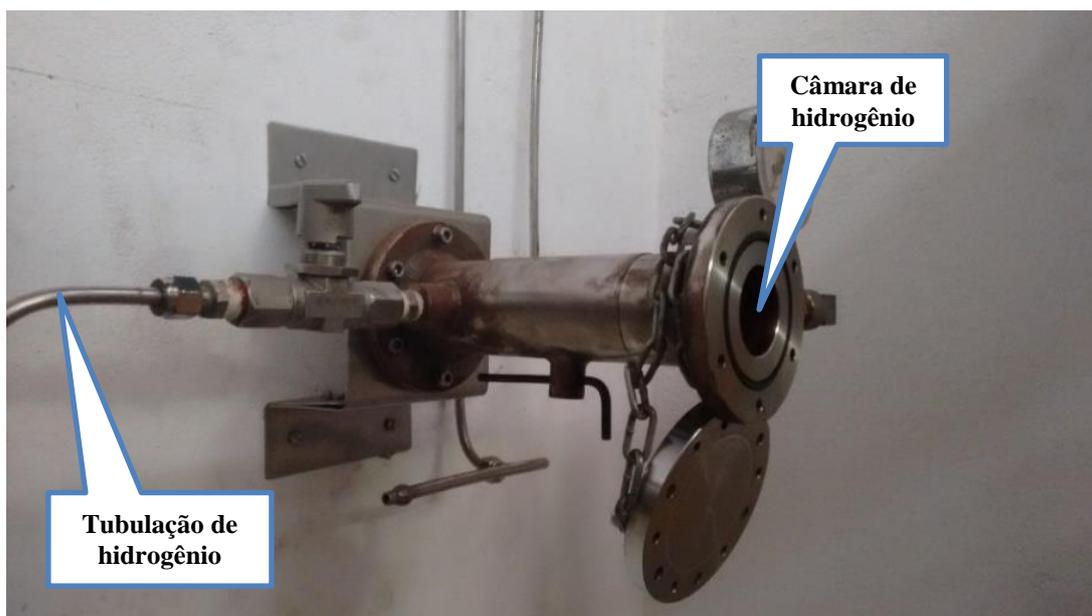


Figura 4.1: Câmara de hidrogênio para incremento da fotossensibilidade da fibra óptica

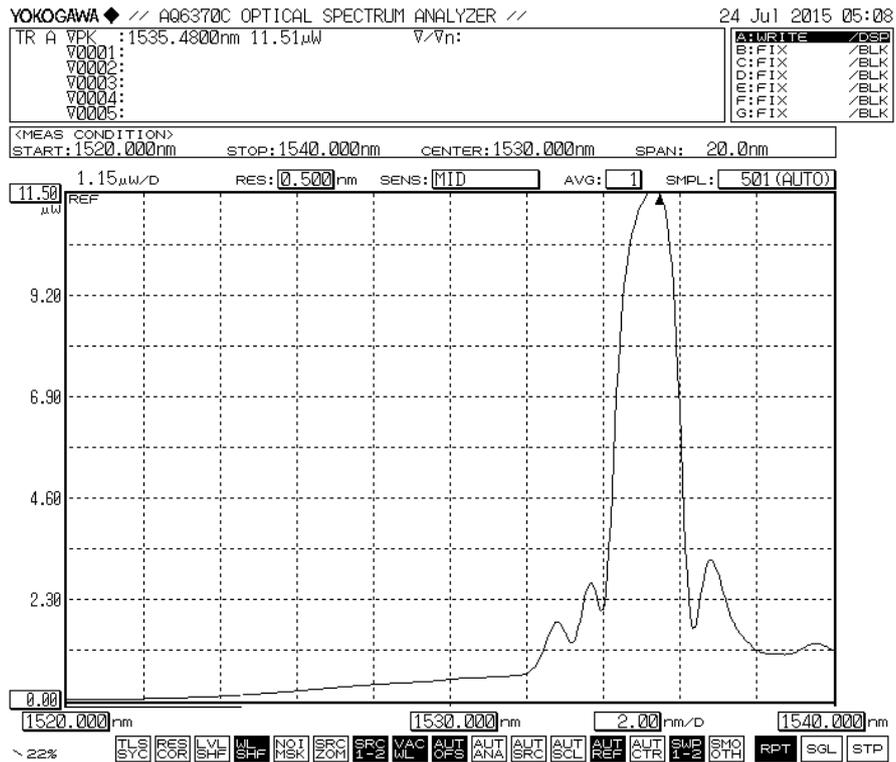


Figura 4.2: Espectro óptico de reflexão da rede de Bragg sensora

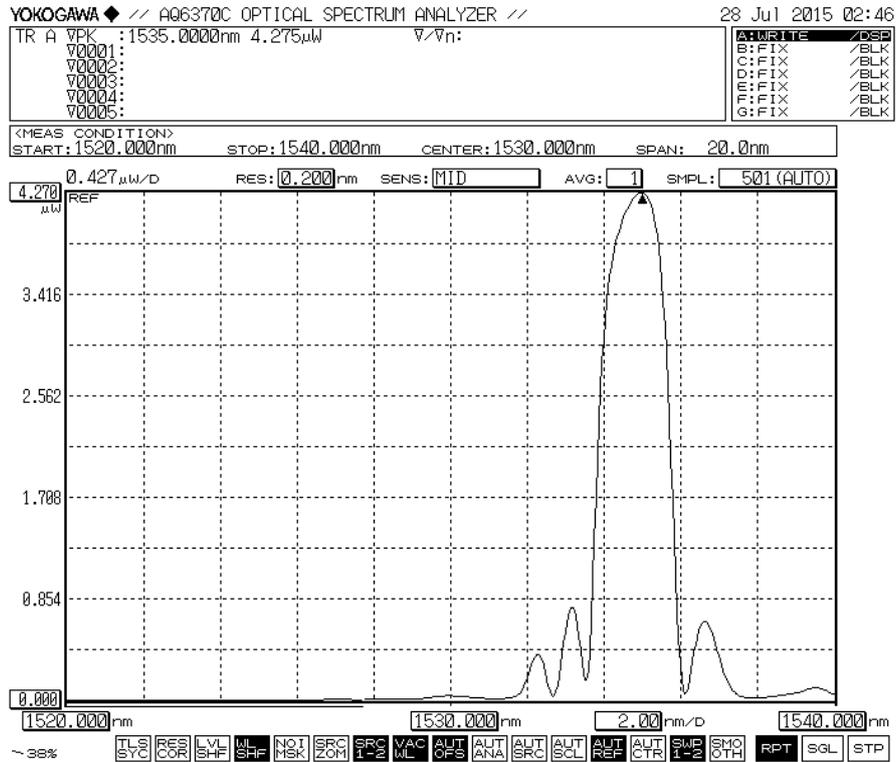


Figura 4.3: Espectro óptico de reflexão da rede de Bragg filtro fixo

As redes de Bragg foram inscritas através de um *laser* modelo Innova 300 C FreD do fabricante Coherent utilizando o método da máscara de fase. Suas especificações são: comprimento de onda de 244 nm (UV) e potência óptica de saída máxima de 0,1 W [35].

4.2 Terfenol-D

O Terfenol-D foi o elemento transdutor responsável pela conversão da energia magnética em energia mecânica, *strain*. No sistema foram empregadas duas hastes em formato retangulares adquiridas junto à empresa norte-americana ETREMA, Inc. com dimensões 80 mm X 10 mm X 10 mm (comprimento, largura e altura, respectivamente), conforme Figura 4.4.

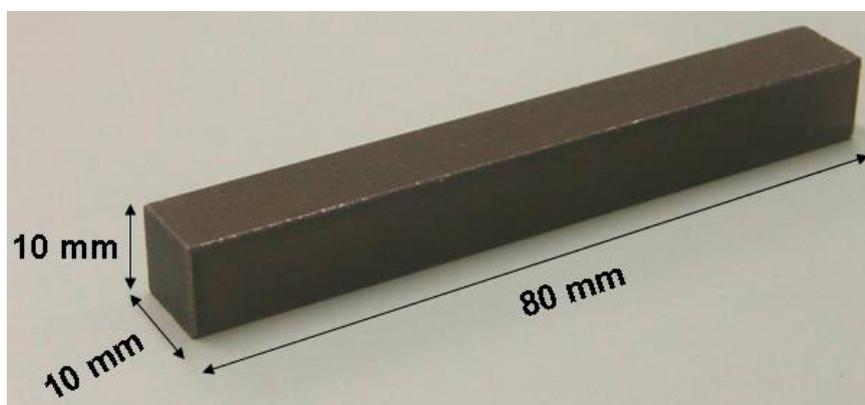


Figura 4.4: Dimensões das hastes de Terfenol-D [3]

4.3 Micrômetro e Fotopolimerizador LED

Foi empregado um conjunto posicionador mecânico com micrômetro e um fotopolimerizador LED (*Light Emission Diode*) para esticar as redes de Bragg, de modo que acompanhem as deformações do Terfenol-D, e fixá-las às hastes de Terfenol-D. O fotopolimerizador LED modelo Poly 600 do fabricante KaVo, Figura 4.5, possui faixa de comprimento de onda entre 450 e 460 nm e potência efetiva luminosa de 600 mW/cm² [36].

Para correta fixação das redes de Bragg ao Terfenol-D foi aplicado um processo de adesão simples, rápido e eficiente: o processo de fotopolimerização com resina. A utilização do processo de fotopolimerização da resina permitiu alcançar o objetivo de implementar um processo superior de fixação da rede de Bragg à peça magnetostrictiva e também sua operação em ambientes com temperaturas acima de 120 °C, onde a maioria dos adesivos disponíveis comercialmente não conseguem suportar e provocam erros nos resultados das medidas [19].



Figura 4.5: Fotopolimerizador KaVo Poly 600 [36]

Conforme é possível observar na Figura 4.6, as hastes de Terfenol-D foram sustentadas pelo posicionador mecânico para não se moverem enquanto o procedimento de fixação era executado. O procedimento de fixação por fotopolimerização transcorre por cinco etapas: na primeira, uma limpeza da superfície do Terfenol-D para retirada das impurezas é necessária, para tal, utilizou-se o Condacporcelana que contém ácido fluorídrico a 10 %; a próxima etapa consistiu na remoção deste produto com água filtrada e secagem com ar quente de um soprador térmico por um minuto; a terceira etapa baseou-se na aplicação do Silano Prosil para promover adesão entre a resina e a superfície do metal; já a quarta etapa consistiu na aplicação do adesivo *Alpha Bond Light* sobre uma das extremidades da fibra óptica e fotopolimerização por cinco minutos, este adesivo promove adesão da resina fotoativada à superfície desejada; a quinta e última etapa desenvolveu-se da mistura da resina *Enforce-Core* base e o catalisador até adquirirem uma coloração uniforme. A resina foi fotopolimerizada por dez minutos.

O procedimento descrito acima foi repetido para fixação da outra extremidade da fibra óptica após um período de curagem da cola de duas horas. É importante ressaltar que antes de reiniciar o processo é necessário esticar a fibra e acompanhar em um interrogador óptico a variação do λ_B a fim de se obter o valor desejado.

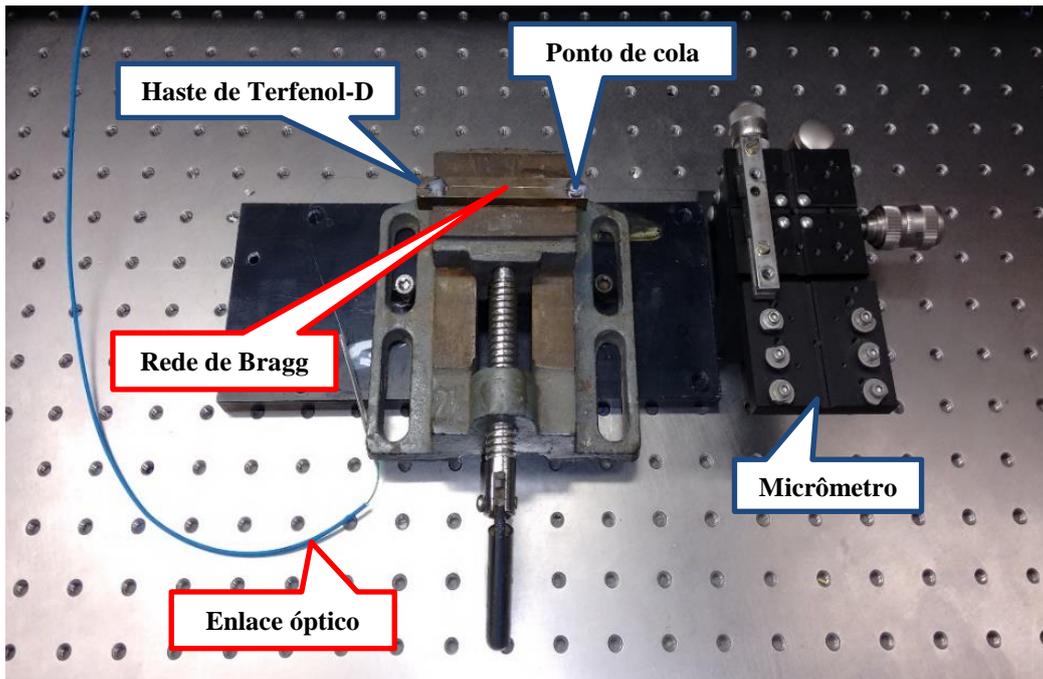


Figura 4.6: Posicionador mecânico com micrômetro segurando uma haste de Terfenol-D

4.4 Fonte de Luz

Uma fonte de luz tipo ASE da marca *OptoLink* foi empregada, Figura 4.7. Suas principais características são: espectro de emissão contínua de 1520 a 1565 nm, potência óptica de saída maior que 11 dBm ou 12,6 mW e estabilidade da potência óptica igual a $\pm 0,3$ dB por 1 hora [37].



Figura 4.7: Fonte de luz tipo ASE

4.5 Circulador Óptico

Dois circuladores ópticos do fabricante *OptoLink* com as seguintes características foram empregados: modelo COFO_2-2-2, comprimento de onda de operação entre 1310

nm e 1550 nm e perda de inserção entre portas menor que 1 dB [37]. O circulador óptico é apresentado na Figura 4.8.



Figura 4.8: Circulador óptico

O circulador foi o responsável por direcionar o sinal luminoso da fonte de luz para a rede de Bragg sensora e filtro fixo a fim de se demodular o sinal refletido e obter a medição da corrente elétrica.

4.6 Fotodetector-amplificador

Foi empregado um conjunto fotodetector-amplificador modelo PDA10CS do fabricante THORLABS, Figura 4.9. Este equipamento converte e amplifica o sinal óptico em sinal de tensão proporcional, permitindo monitoração por um osciloscópio graças ao seu circuito de ganho integrado de 0 a 70 dB e pela capacidade de gerar um sinal de saída de 0 a 10 V [38].



Figura 4.9: Fotodetector-amplificador [38]

4.7 Osciloscópio

Um osciloscópio modelo DS1102CA de dois canais do fabricante RIGOL foi empregado. Ligado à saída do conjunto fotodetector-amplificador, ele monitora e mede a corrente elétrica que flui pelo condutor.

4.8 Transformador de Corrente

Para injeção de corrente elétrica no sistema foram empregados dois TC's em série e conectados inversamente, isto é, entrada pelo terminal secundário e saída pelo primário, conforme descrito por [3]. Os dois TC's em série permitem variar a corrente elétrica de zero até cerca de 800 A em um condutor constituído de cabo de cobre isolado que suporta até 1000 A.

4.9 Transformador Variável

As variações da corrente elétrica no condutor e na temperatura no interior da caixa de papel foram realizadas por dois VARIAC's (Transformadores Variáveis). O primeiro, VARIAC 1, conectado aos TC's descritos da seção 4.8, é o modelo M-2420 do fabricante Auje. Suas características são: monofásico, potência nominal de 4,8 kVA, 20 A e tensão de saída de 0 a 240 V [39]. Já o segundo, um TSGC2-15 do fabricante JNG, foi conectado à uma resistência de 35 Ω para induzir variação de temperatura no interior na caixa de papel. As características desse VARIAC são: trifásico, potência nominal de 15 kVA e tensão de saída de 0 a 430 V [40]. As Figuras 4.10 e 4.11 apresentam os dois modelos, respectivamente.

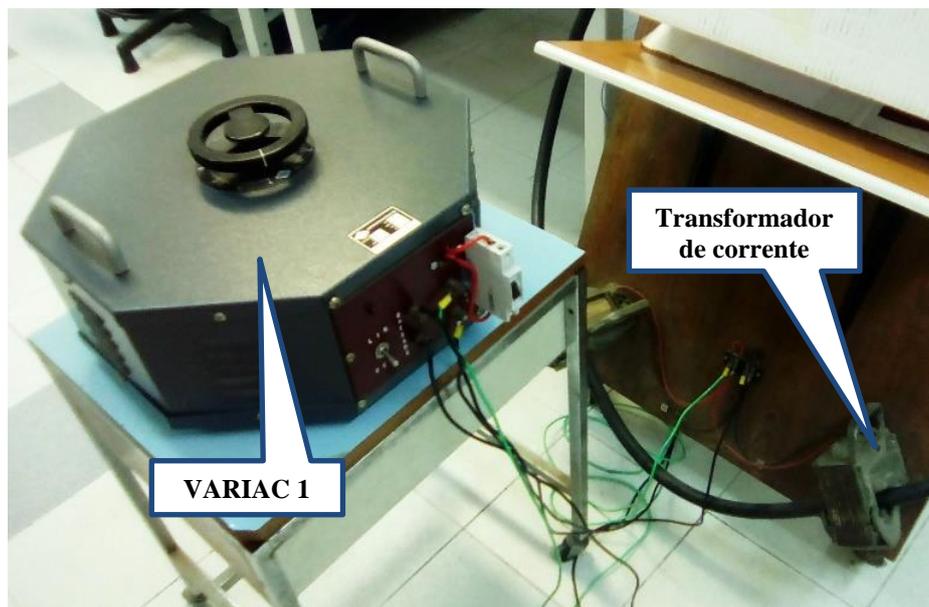


Figura 4.10: VARIAC I conectado aos TC's



Figura 4.11: VARIAC da JNG [40]

4.10 Pinça de Corrente Elétrica

Uma pinça de corrente elétrica AC comercial, modelo Fluke i2000 FLEX e escala 1 mV/A, foi empregada para comparação dos resultados de medição de corrente do sensor optomagnético e também para referência deste. Algumas de suas especificações são: linearidade $\pm 0,2\%$ da leitura, precisão de 1% da faixa a 25 °C e ruído de 2 mV AC rms em 300 A [41]. A Figura 4.12 apresenta a pinça i2000 FLEX.



Figura 4.12: Pinça de corrente elétrica Fluke i2000 FLEX

4.11 Analisador de Espectro Óptico e Filtro Sintonizável de Fabry-Perot

Um analisador de espectro óptico, OSA (*Optical Spectrum Analyzer*), modelo AQ637C do fabricante Yokogawa foi empregado em conjunto com um filtro sintonizável de Fabry-Perot da *Oz Optics*, Figura 4.13.



Figura 4.13: Filtro sintonizável de Fabry-Perot da Oz Optics [42]

Este arranjo foi empregado para identificação do valor do λ_B que a rede filtro fixo deveria possuir a fim de fornecer à saída do sistema uma convolução do seu espectro com o da rede sensora.

Para obtenção do λ_B da rede filtro fixo fez-se necessário primeiramente a sintonização do filtro de Fabry-Perot através do *set-up* da Figura 4.14. Já de posse do valor do λ_B da rede sensora obtido através das etapas da seção 4.3 e com o emprego do filtro de Fabry-Perot, é possível simular a rede de Bragg filtro fixo e conseqüentemente chegar ao valor do λ_B necessário para que a convolução dos espectros das redes de Bragg esteja em seu ponto ótimo de operação.

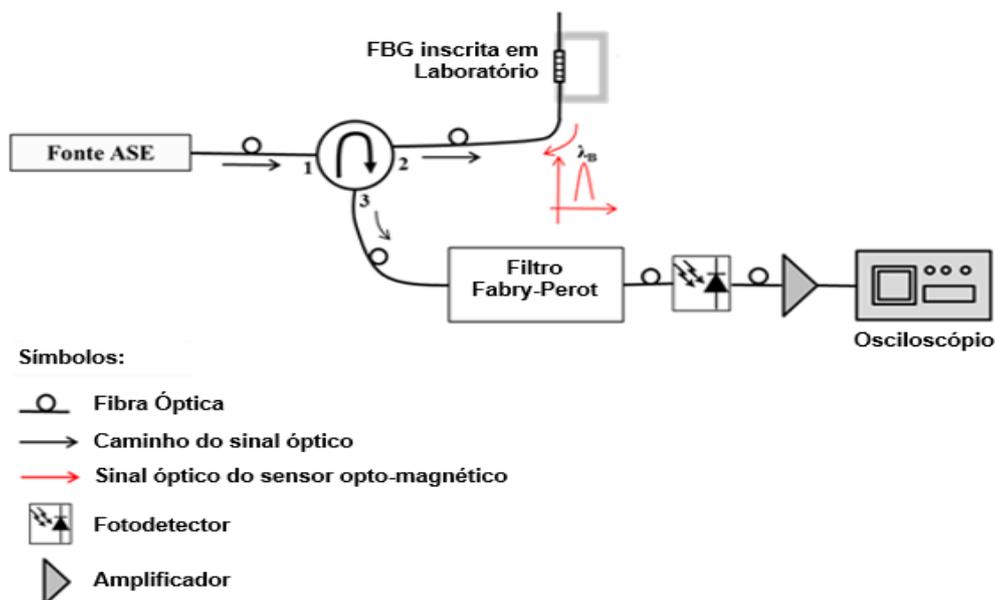


Figura 4.14: *Set-up* para sintonização do filtro de Fabry-Perot (adaptado de [3])

Finalmente, após a sintonização do filtro de Fabry-Perot foi empregado o *set-up* da Figura 4.15 para a leitura do seu λ_B e assim repassá-lo à rede filtro fixo. A luz que é emitida pelo ASE atinge o filtro sintonizável de Fabry-Perot, uma parte característica é transmitida, chega ao OSA e o λ_B é lido na tela.

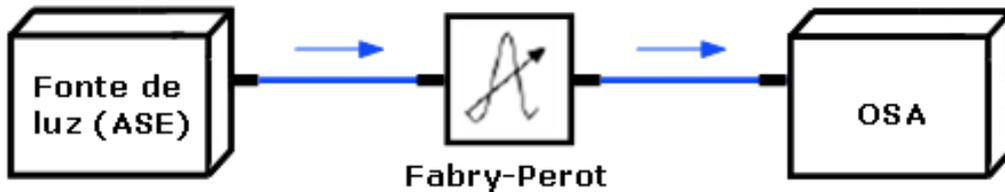


Figura 4.15: Leitura do λ_B da rede de Bragg filtro fixo

4.12 Interrogador Óptico

Um interrogador óptico do fabricante *Micron Optics*, modelo SM125-200, foi empregado no experimento de calibração por temperatura das hastes de Terfenol-D. Este equipamento possui uma porta Ethernet que foi utilizada para ler e armazenar em um notebook as variações dos λ_B à medida que a temperatura era elevada, seção 4.16. Além disso, o equipamento contém quatro canais ópticos, faixa nominal de 1510 a 1590 nm, precisão de 10 pm e frequência de 1 Hz [43]. A Figura 4.16 apresenta o interrogador óptico SM125-200.



Figura 4.16: Interrogador óptico da *Micron Optics* [43]

4.13 Agitador Térmico

Para o cálculo dos CTE's das hastes de Terfenol-D foi empregado um agitador térmico de modelo Q-261A11 da *Quimis*, um *becker* e uma pequena barra metálica, chamada *peixinho*, para agitar e homogeneizar a temperatura da água enquanto era elevada de 15 para 55 °C.

4.14 Termômetro

A fim de aferir a variação de temperatura durante o ensaio e permitir posterior cálculo do CTE das hastes de Terfenol-D, foi empregado um termômetro Salvterm 120 de platina da Salcas, Figura 4.17. Já para a medição da temperatura no interior da caixa de papel, um termômetro modelo SDL200 de quatro canais do fabricante *Extech Instruments* foi empregado, Figura 4.18.



Figura 4.17: Termômetro Salvterm 120



Figura 4.18: Termômetro da Extech [44]

O tipo de termopar empregado em conjunto com o termômetro foi o tipo K, este possui resolução de 0,1 °C, faixa de operação de -50,0 a 999,9 °C e precisão de $\pm 0,4 \% + 0,5 \text{ }^\circ\text{C}$ [44].

4.15 Haste de Terfenol-D Posicionada Paralelamente ao Condutor

Um ensaio para averiguar a possibilidade do emprego de uma segunda rede de Bragg fixada à uma nova haste de Terfenol-D para fins de interrogação da rede de Bragg sensora foi realizado. Para tal, ao contrário do primeiro conjunto (rede de Bragg + Terfenol-D), este novo foi alocado paralelamente ao condutor de corrente elétrica, conforme Figura 4.19, e o sinal de saída do sistema foi analisado no osciloscópio. O *set-up* utilizado no ensaio é apresentado na Figura 4.20.

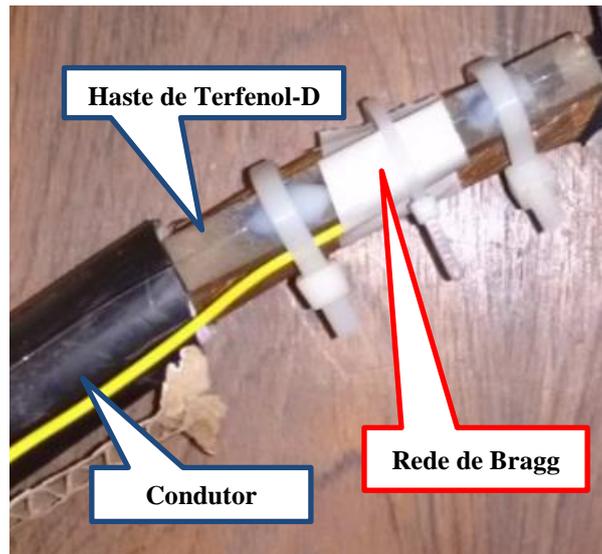


Figura 4.19: Fotografia do ensaio do Terfenol-D posicionado paralelamente ao condutor de corrente

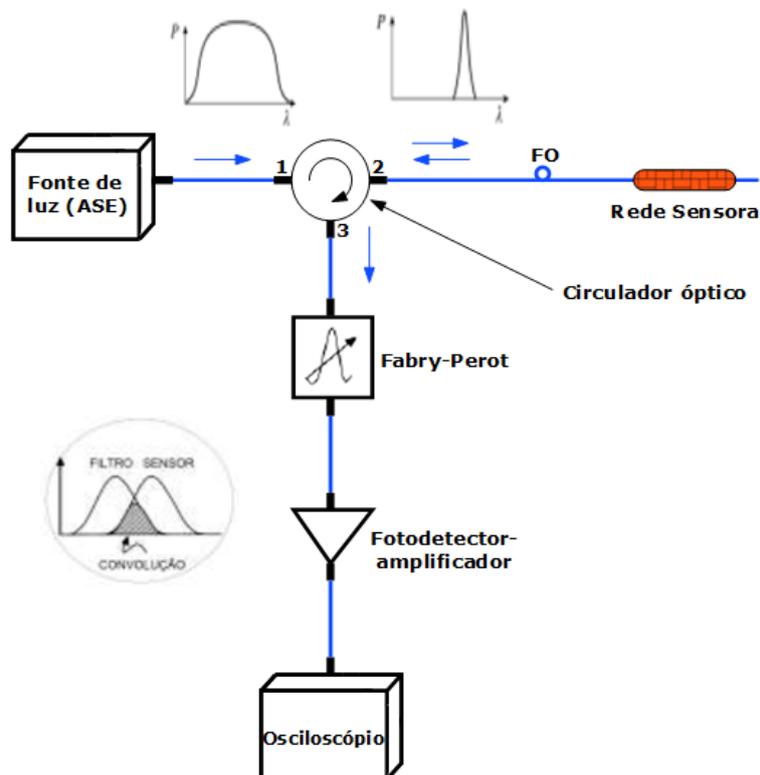


Figura 4.20: *Set-up* do ensaio do Terfenol-D posicionado paralelamente ao condutor de corrente

A haste de Terfenol-D foi alocada paralelamente ao condutor a fim de que na presença de um campo magnético externo não se deformasse na mesma direção das grades de Bragg e assim, induzisse variação no λ_B da FBG. Conforme é possível observar na Figura 4.21, a direção da deformação da haste é análoga às linhas de campo magnético, portanto não induz variação no λ_B .

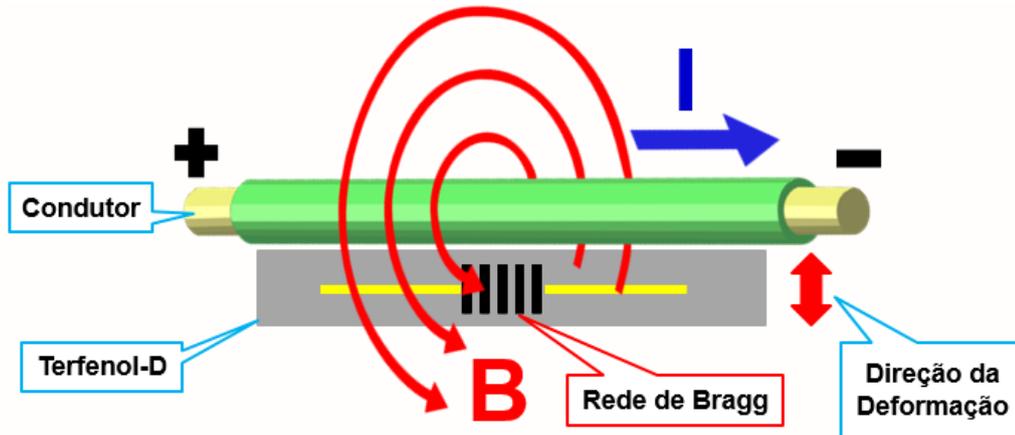


Figura 4.21: Direção da deformação da haste de Terfenol-D posicionada paralelamente ao condutor

4.16 Cálculo do Coeficiente de Expansão Térmica das hastes de Terfenol-D

O objetivo principal e tema dessa dissertação é a compensação dos efeitos da variação de temperatura no sistema de medição de corrente elétrica. Para mitigar estes efeitos é necessário possuir metais com os mesmos CTE's de modo que dilatem-se semelhantemente à qualquer variação da temperatura no ambiente em que estão alocados. Para o cálculo dos CTE's foi empregado o ensaio da Figura 4.22, onde é possível observar duas hastes de Terfenol-D submergidas em água contida em um *becker* posicionado sobre um agitador térmico, um interrogador óptico conectado a um notebook lendo as variações dos λ_B das redes de Bragg e um termômetro medindo e armazenando as temperaturas do interior do *becker*. O ensaio foi iniciado com a temperatura de 15 °C e finalizado com a de 55 °C. A Figura 4.23 apresenta uma fotografia do ensaio.

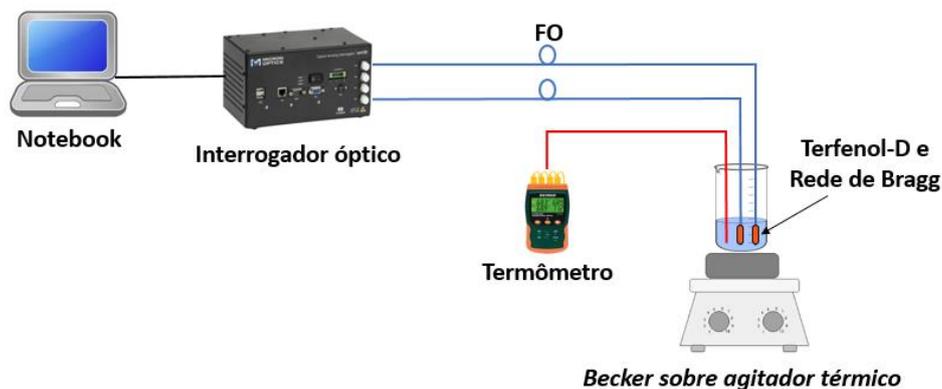


Figura 4.22: Set-up do ensaio para o cálculo do CTE do Terfenol-D

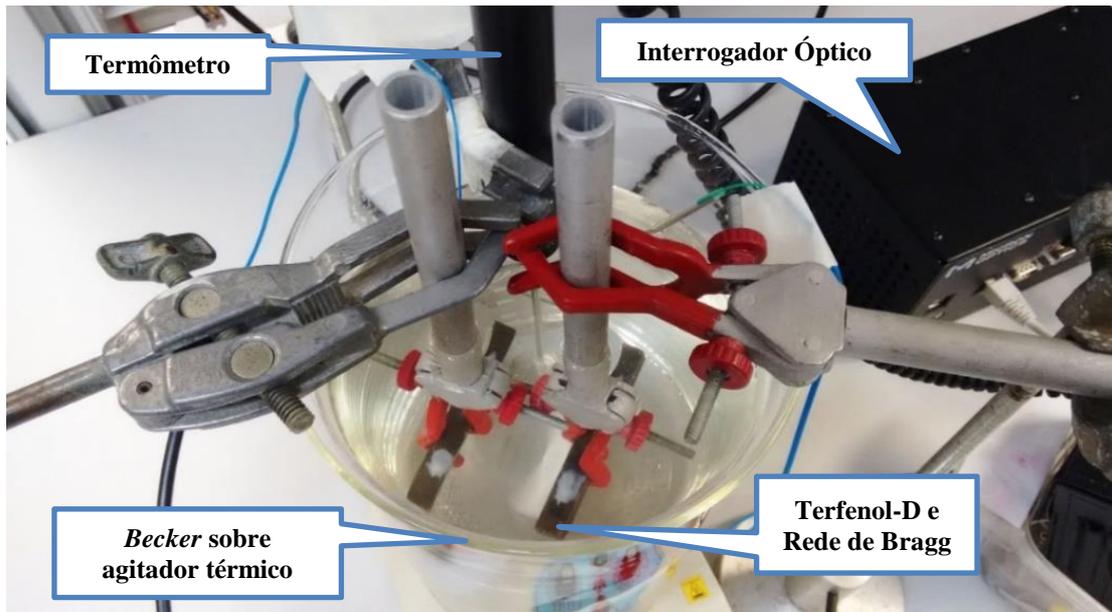


Figura 4.23: Fotografia do ensaio para o cálculo do CTE do Terfenol-D

4.17 Compensação de Temperatura

Com o resultado dos valores dos CTE's em mãos foi possível partir para realização do principal ensaio, a compensação de temperatura.

Para fins de comparação, foram realizados ensaios sem e com compensação de temperatura, Figuras 4.24 e 4.25, respectivamente. Uma fotografia do experimento é mostrada na Figura 4.26.

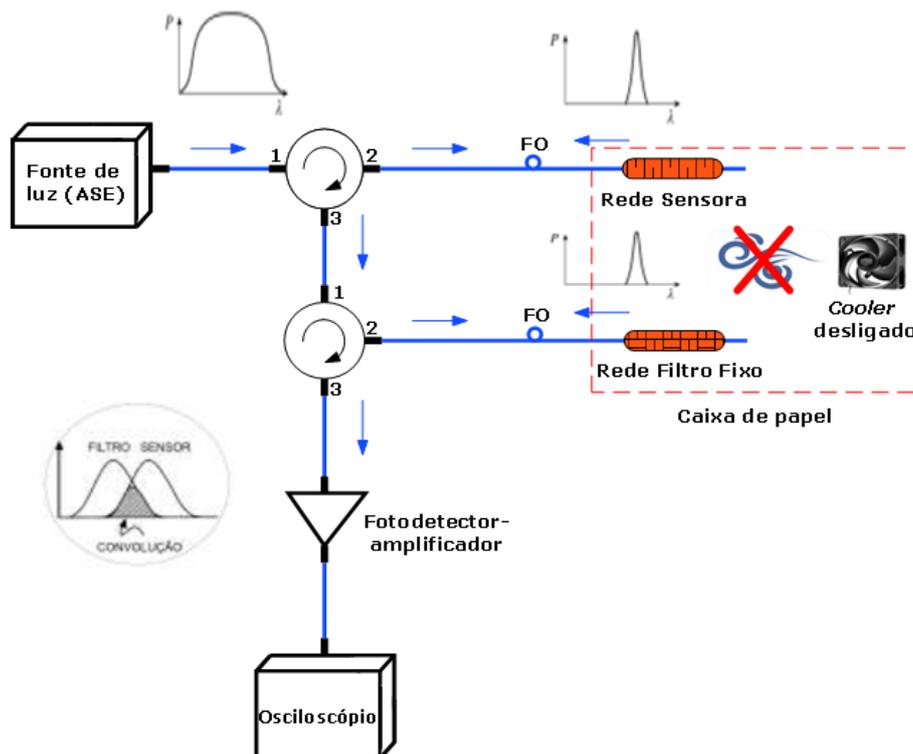


Figura 4.24: Ensaio sem compensação de temperatura

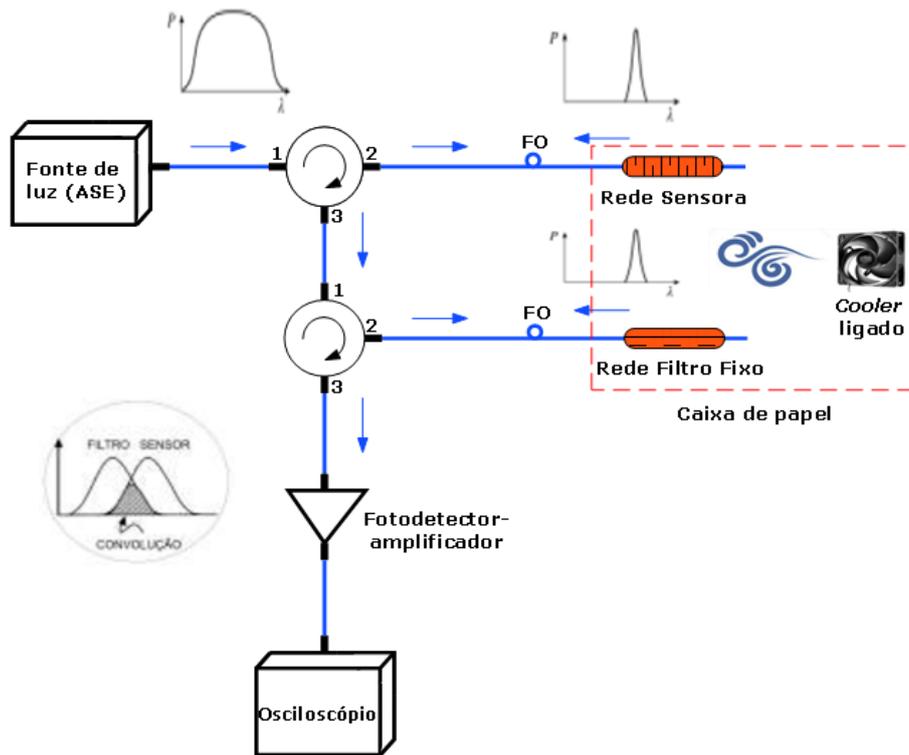


Figura 4.25: Ensaio com compensação de temperatura

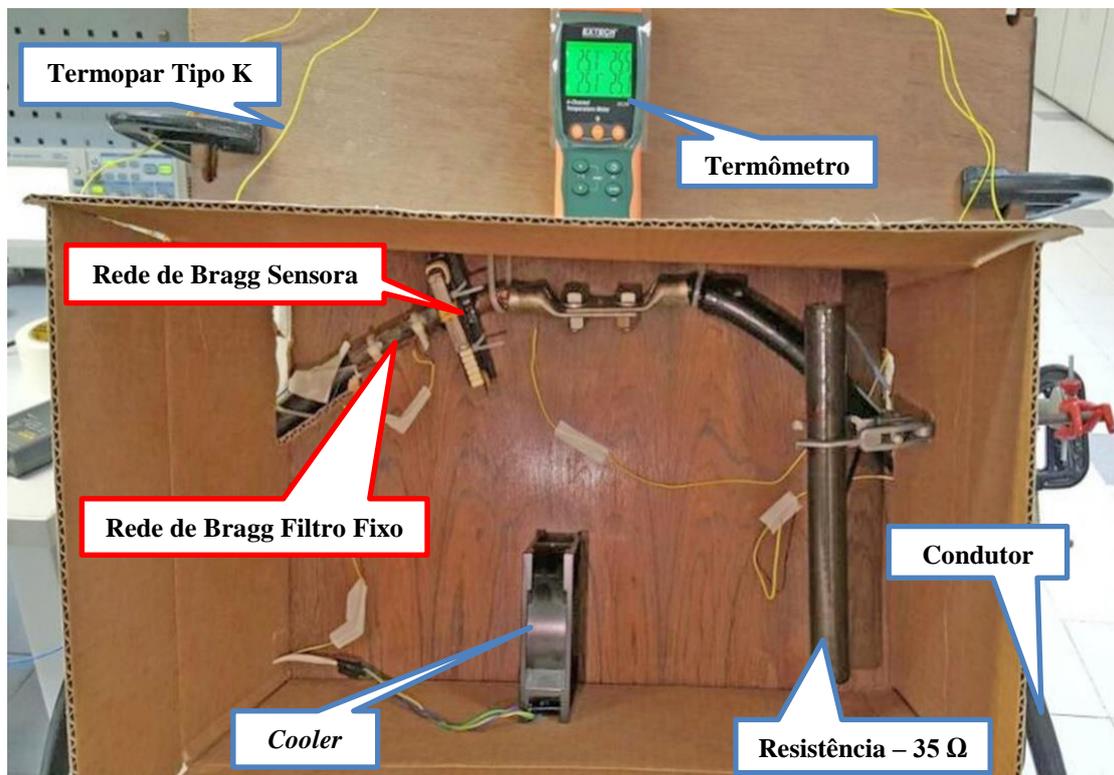


Figura 4.26: Fotografia do arranjo experimental para os ensaios com e sem compensação de temperatura

No primeiro ensaio, sem compensação de temperatura, a caixa de papel foi deixada aberta trocando ar com o ambiente do LIF e o *cooler* ficou desligado. Já no

segundo, a caixa de papel foi fechada, isolada do ambiente externo e o *cooler* ficou ligado para circulação do ar. A temperatura no interior da caixa de papel foi variada utilizando uma resistência de 35 Ω .

4.18 Linearidade

A fim de se averiguar se o sinal de saída do sistema, tensão, é diretamente proporcional à corrente elétrica medida, a linha de tendência de linearidade do sistema foi calculada e plotada. Os dados foram coletados do osciloscópio e os resultados são apresentados na seção 5.6.

4.19 Transformada Rápida de *Fourier* e Distorção Harmônica Total

Com o objetivo de avaliar as amplitudes das componentes harmônicas do sinal de saída do sistema, foi realizado o cálculo da FFT (*Fast Fourier Transform*). Ainda, em posse desses dados, as formas de onda foram analisadas em termos da THD (*Total Harmonic Distortion*) utilizando o Matlab em conjunto com o Simulink.

O valor da THD é calculado através da Equação 4.1 e é um importante parâmetro para avaliar a qualidade da energia do sinal medido, pois quanto menor seu valor, menos distorcido é o sinal em relação à fundamental (60 Hz). A quantidade de harmônicas é sinônimo de uma forma de onda deformada [9].

$$\text{THD (\%)} = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^{\infty} V_i^2}}{V_1} \quad (4.1)$$

onde, V_i é a tensão eficaz (RMS) da harmônica de ordem i e V_1 a tensão eficaz (RMS) da harmônica de ordem 1 (frequência fundamental).

A Figura 4.27 apresenta o diagrama de blocos do Simulink utilizado para obter o valor da THD.

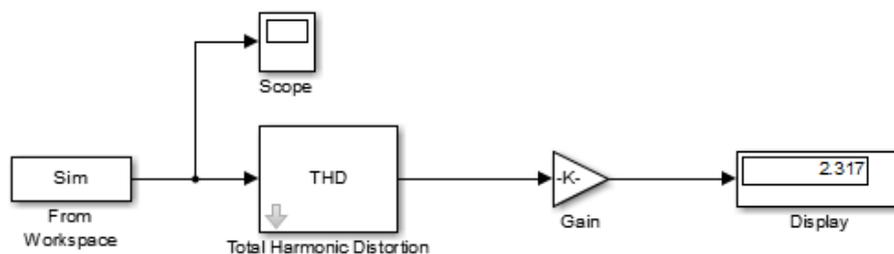


Figura 4.27: Diagrama de blocos do Simulink para análise da THD para uma corrente elétrica de aproximadamente 200 A_{RMS}

Capítulo 5

Resultados e Discussões

Neste capítulo são apresentados os resultados e respectivas discussões para os ensaios descritos no capítulo anterior.

5.1 Ensaios Preliminares

Para que pudessem ser utilizadas como sensor, as redes de Bragg foram previamente caracterizadas quanto à sensibilidade em relação à temperatura e ao *strain*. Utilizando um *set-up* similar ao da Figura 4.22, as redes de Bragg, ainda não fixadas às hastes de Terfenol-D, foram submergidas em água contida em um *becker* posicionado sobre um agitador térmico. As variações dos λ_B devido à variação de temperatura e *strain* foram armazenadas, analisadas e como resultado foram obtidas as seguintes sensibilidades: 10,90 pm / °C para temperatura e 1,16 pm / $\mu\epsilon$ para o *strain*. Estes valores são respectivamente 3,28 pm / °C e 0,05 pm / $\mu\epsilon$ menores que os valores teóricos das fibras ópticas de sílica dopadas com germânio. Tais diferenças podem ser explicadas devido às variações das constantes das Equações 2.3 e 2.4.

A próxima etapa foi a fixação da rede de Bragg sensora à haste de Terfenol-D, conforme descrito na seção 4.3, após o qual a rede de Bragg apresentou um λ_B de 1537,706 nm.

5.2 Haste de Terfenol-D Posicionada Paralelamente ao Condutor de Corrente Elétrica

Os resultados do ensaio descrito na seção 4.15 são apresentados entre as Figuras 5.1 e 5.5. Eles comprovam que a nova haste de Terfenol-D empregada não sofreu os efeitos da magnetostricção, ao menos visíveis, quando alocada paralelamente ao condutor de corrente elétrica. Os sinais em azul representam a resposta da pinça de corrente de referência descrita no seção 4.10, enquanto que os sinais em vermelho são fornecidos pela rede de Bragg sensora posicionada paralelamente ao condutor. A temperatura do ambiente foi monitorada e permaneceu constante em 25 °C.

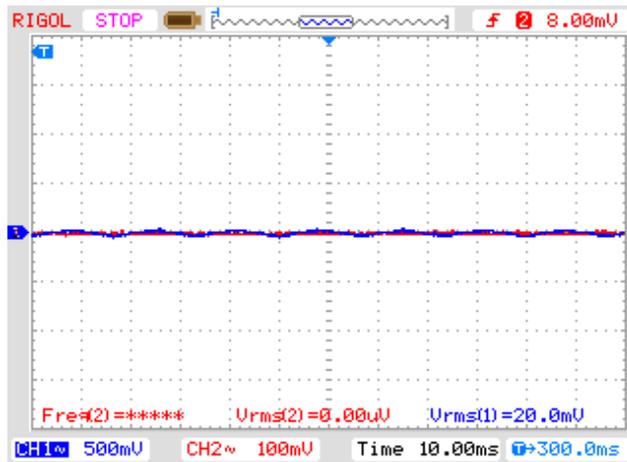


Figura 5.1: Resposta do sensor optomagnético (em vermelho) e da pinça de corrente AC (sinal azul) para uma corrente elétrica de aproximadamente 20 A_{RMS}

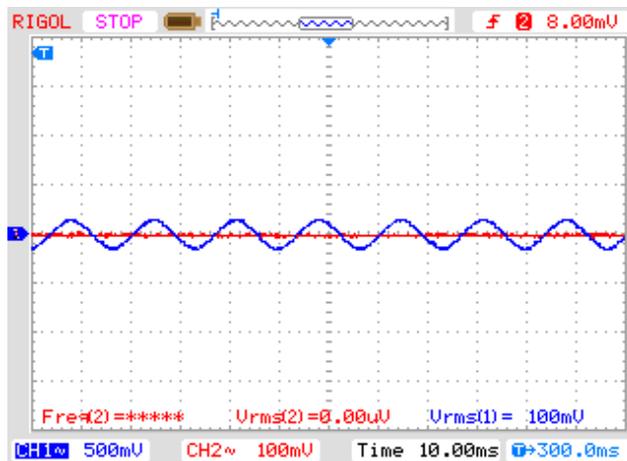


Figura 5.2: Resposta do sensor optomagnético (em vermelho) e da pinça de corrente AC (sinal azul) para uma corrente elétrica de aproximadamente 100 A_{RMS}

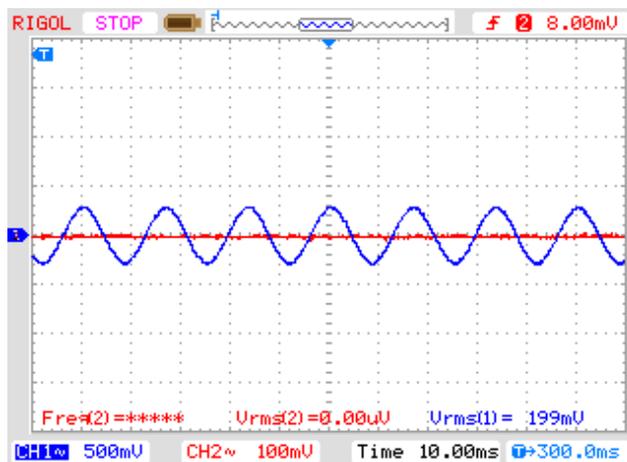


Figura 5.3: Resposta do sensor optomagnético (em vermelho) e da pinça de corrente AC (sinal azul) para uma corrente elétrica de aproximadamente 200 A_{RMS}

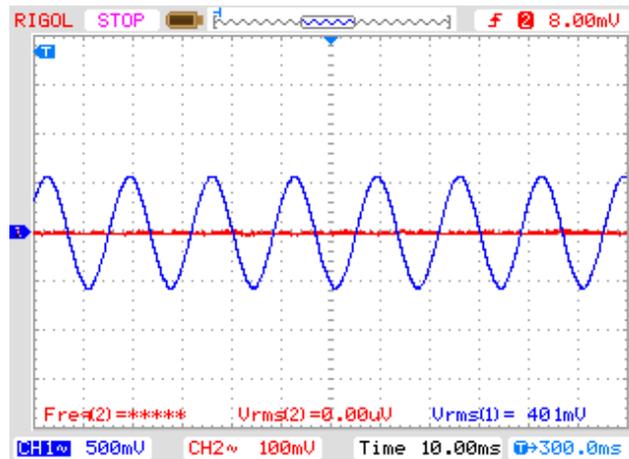


Figura 5.4: Resposta do sensor optomagnético (em vermelho) e da pinça de corrente AC (sinal azul) para uma corrente elétrica de aproximadamente 400 A_{RM}S

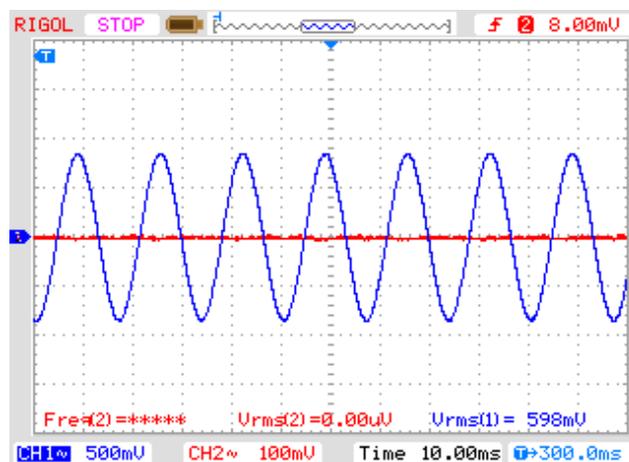


Figura 5.5: Resposta do sensor optomagnético (em vermelho) e da pinça de corrente AC (sinal azul) para uma corrente elétrica de aproximadamente 600 A_{RM}S

Como era esperado, o sinal do canal 2, em vermelho, manteve-se constante e nulo durante todo o ensaio com a haste de Terfenol-D alocada paralelamente ao condutor de corrente elétrica. Fato este esperado e explicado na seção 4.15.

Uma alternativa caso o ensaio não tivesse tido resultado satisfatório seria a utilização do Monel400, assim como fizeram MORA [28] e CHIANG [29].

5.3 Determinação do Comprimento de Onda da Rede de Bragg Filtro Fixo

O ensaio referente ao *set-up* da Figura 4.15 da seção 4.11 teve como resultado para o λ_B da rede de filtro fixo o valor de 1534,706 nm.

Devido ao fato de possuir mais de um canal óptico e assim permitir a interrogação de mais de uma rede de Bragg, foi empregado o interrogador da *Micron Optics* e o seu software *ENLIGHT* versão 1.5.61 para apresentar os espectros de reflexão das redes de

Bragg gêmeas. No entanto, há uma diferença visível no valor dos λ_B em relação ao apresentado no OSA de aproximadamente 5 nm. Sendo assim, é possível observar na Figura 5.6 os valores de 1542,706 e 1539,706 nm para os λ_B das redes de Bragg sensora e filtro fixo, respectivamente.

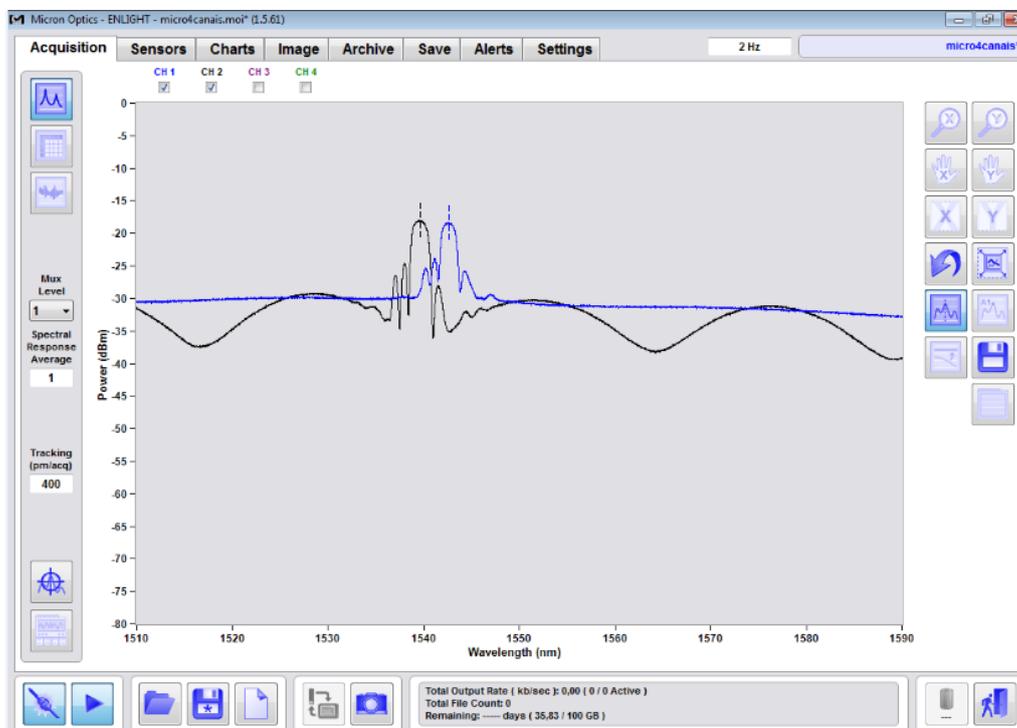


Figura 5.6: Espectros das redes de Bragg gêmeas - filtro fixo em preto e sensora em azul

5.4 Cálculo dos Coeficientes de Expansão Térmica das Hastes de Terfenol-D

A Tabela 5.1 apresenta a variação do λ_B do conjunto rede de Bragg sensora + Terfenol-D em função da elevação da temperatura da água em que ele foi submerso. Já a Figura 5.7 apresenta o gráfico gerado a partir dos dados da tabela.

Tabela 5.1: Variação do λ_B em função da elevação de temperatura – conjunto da rede de Bragg sensora

| Temperatura (°C) | λ_B (nm) |
|------------------|------------------|
| 15,0 | 1541,607 |
| 17,5 | 1541,661 |
| 20,0 | 1541,719 |
| 22,5 | 1541,777 |
| 25,0 | 1541,835 |
| 27,5 | 1541,894 |
| 30,0 | 1541,953 |
| 32,5 | 1542,013 |

| Temperatura (°C) | λ_B (nm) |
|------------------|------------------|
| 35,0 | 1542,075 |
| 37,5 | 1542,137 |
| 40,0 | 1542,199 |
| 42,5 | 1542,263 |
| 45,0 | 1542,327 |
| 47,5 | 1542,390 |
| 50,0 | 1542,456 |
| 52,5 | 1542,522 |
| 55,0 | 1542,588 |

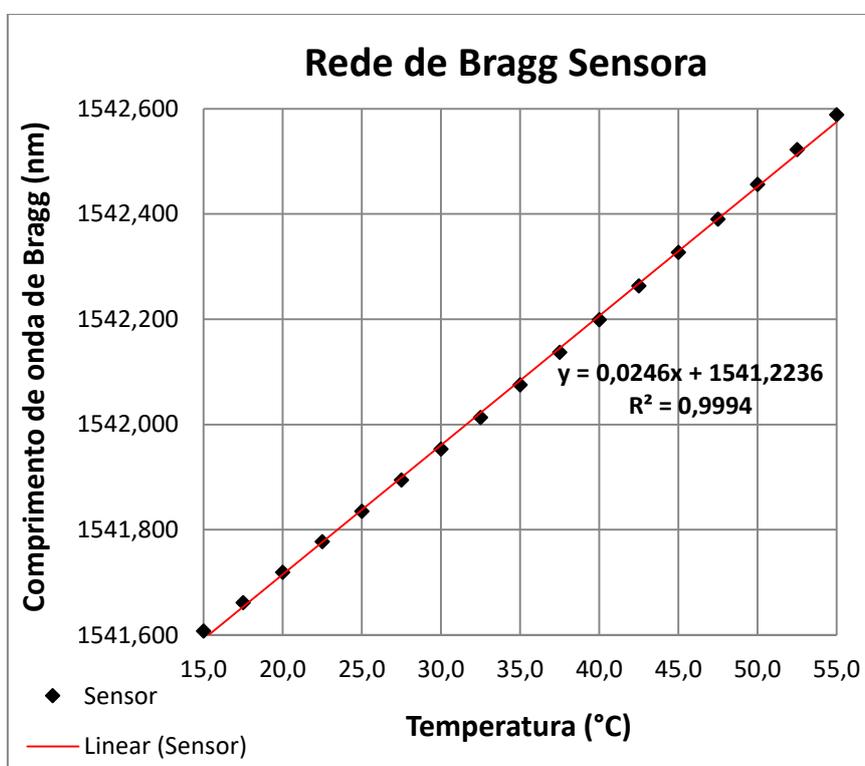


Figura 5.7: Comprimento de onda de Bragg x Temperatura – conjunto da rede de Bragg sensora

Neste gráfico os resultados experimentais apresentaram um coeficiente de correlação linear de 0,9994 e um comportamento linear da expansão da haste de Terfenol.

O mesmo ensaio para o conjunto da rede de Bragg filtro fixo e segunda haste de Terfenol-D foram realizados, conforme Tabela 5.2 e Figura 5.8.

Tabela 5.2: Variação do λ_B em função da elevação de temperatura – conjunto da rede de Bragg filtro fixo

| Temperatura (°C) | λ_B (nm) |
|-------------------------|------------------------------------|
| 15,0 | 1539,846 |
| 17,5 | 1539,900 |
| 20,0 | 1539,957 |
| 22,5 | 1540,014 |
| 25,0 | 1540,071 |
| 27,5 | 1540,130 |
| 30,0 | 1540,189 |
| 32,5 | 1540,249 |
| 35,0 | 1540,311 |
| 37,5 | 1540,372 |
| 40,0 | 1540,433 |
| 42,5 | 1540,497 |
| 45,0 | 1540,561 |
| 47,5 | 1540,623 |
| 50,0 | 1540,687 |
| 52,5 | 1540,751 |
| 55,0 | 1540,815 |

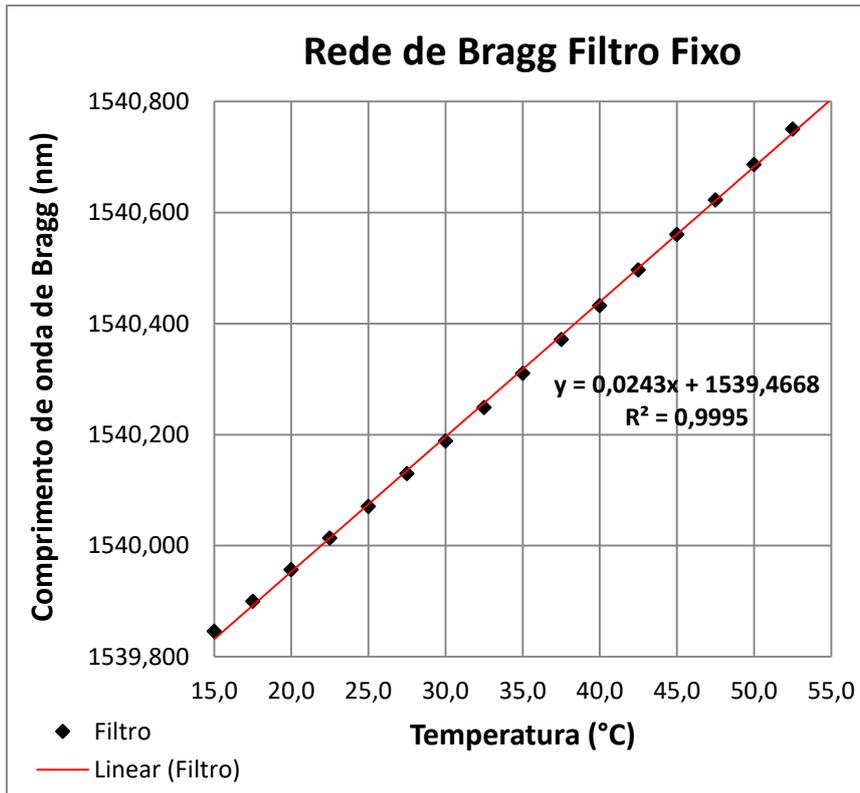


Figura 5.8: Comprimento de onda de Bragg x Temperatura – conjunto da rede de Bragg filtro fixo

Neste gráfico os resultados experimentais apresentaram um coeficiente de correlação linear de 0,9995 e, assim como o anterior, um comportamento linear da expansão da haste de Terfenol-D.

A partir dos resultados obtidos nos gráficos acima foi possível efetuar o cálculo dos CTE's das hastes de Terfenol-D. Seguindo o raciocínio desenvolvido por [9], a variação do comprimento de um dado material quando submetido a variações de temperatura é dada por:

$$\Delta L = L_0 \alpha_1 \Delta T \quad (5.1)$$

onde, ΔL é a variação do comprimento do material, L_0 o comprimento inicial do material, α_1 o coeficiente de dilatação linear do material e ΔT é a variação da temperatura.

As redes de Bragg foram fixadas sobre as extremidades das hastes de Terfenol-D, sendo assim, uma deformação no Terfenol-D gera uma deformação proporcional na rede de Bragg:

$$\varepsilon_{\text{Terfenol-D}} = \varepsilon_{\text{FBG}}$$

$$\frac{\Delta L_{\text{Terfenol}}}{L_{\text{Terfenol}}} = \frac{\Delta L_{\text{FBG}}}{L_{\text{FBG}}} \quad (5.2)$$

Substituindo a Equação 5.1 na 5.2 a deformação linear do Terfenol-D fica:

$$\frac{\Delta L_{\text{Terfenol}}}{L_{\text{Terfenol}}} = \alpha_{\text{Terfenol}} \Delta T \quad (5.3)$$

Já a deformação da rede de Bragg quando substituí a Equação 5.3 na 5.2 é igual:

$$\frac{\Delta L_{\text{FBG}}}{L_{\text{FBG}}} = \alpha_{\text{Terfenol}} \Delta T \quad (5.4)$$

Substituindo a Equação 5.4 na 2.2 temos:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta \lambda_B}{\lambda_B} &= (1 - \rho_e) \frac{\Delta L_{\text{FBG}}}{L_{\text{FBG}}} + (\alpha_{\text{FBG}} + \eta) \Delta T \\ \frac{\Delta \lambda_B}{\lambda_B} &= (1 - \rho_e) \alpha_{\text{Terfenol}} \Delta T + (\alpha_{\text{FBG}} + \eta) \Delta T \\ \frac{\Delta \lambda_B}{\Delta T} &= (1 - \rho_e) \lambda_B \alpha_{\text{Terfenol}} + (\alpha_{\text{FBG}} + \eta) \lambda_B \end{aligned} \quad (5.5)$$

Os coeficientes fotoelástico e termo-óptico também foram calculados utilizando as sensibilidades das redes de Bragg quanto à *strain* e temperatura. Isto devido ao fato que as sensibilidades quanto ao *strain* e temperatura foram divergentes dos teóricos para fibras ópticas de sílica dopadas com germânio:

$$\rho_e = 1 - \frac{\Delta \lambda_B}{\epsilon_{\text{FBG}} \lambda_B} \quad (5.6)$$

$$\eta = \frac{\Delta \lambda_B}{\Delta T} \frac{1}{\lambda_B} - \alpha \quad (5.7)$$

Os valores encontrados respectivamente foram: 0,248 e $6,52 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ para rede de Bragg sensora e 0,247 e $6,53 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ para rede de Bragg filtro fixo.

Finalmente, substituindo na Equação 5.5 os valores do λ_B da rede sensora a 25°C e os coeficientes fotoelástico, de expansão térmica da sílica dopada com germânio e o termo-óptico, obteve-se:

$$\alpha_{\text{Terfenol}} = 11,75 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C} \quad (5.8)$$

Já para o conjunto da rede de Bragg filtro fixo o valor do CTE calculado para a haste de Terfenol-D foi de $11,50 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$.

Segundo [17, 18], o CTE do Terfenol-D é $12 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$. Os resultados encontrados no ensaio ficaram próximos entre si e do teórico, proporcionando a

comprovação da veracidade da informação repassada pelos autores e deu boas perspectivas da possibilidade real de se obter a compensação de temperatura no sistema.

5.5 Ensaios com e sem Compensação de Temperatura

5.5.1 Sem Compensação de Temperatura

Entre as Figuras 5.9 e 5.13 são apresentadas as respostas obtidas do osciloscópio para o sistema sem compensação de temperatura do ensaio do *set-up* da Figura 4.24. Durante todo o ensaio a corrente foi mantida constante em aproximadamente 320 A e a temperatura no interior da caixa de papel variada em 24,4 °C.

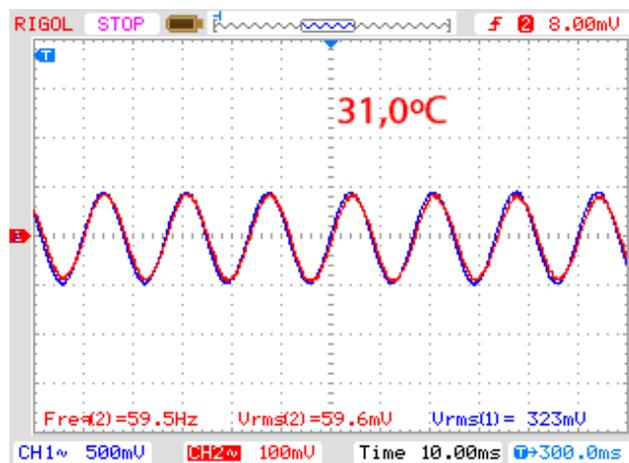


Figura 5.9: Resposta do sensor optomagnético (em vermelho) e da pinça de corrente AC (sinal azul) para uma corrente elétrica de aproximadamente 320 A_{RMS} e temperatura de 31 °C

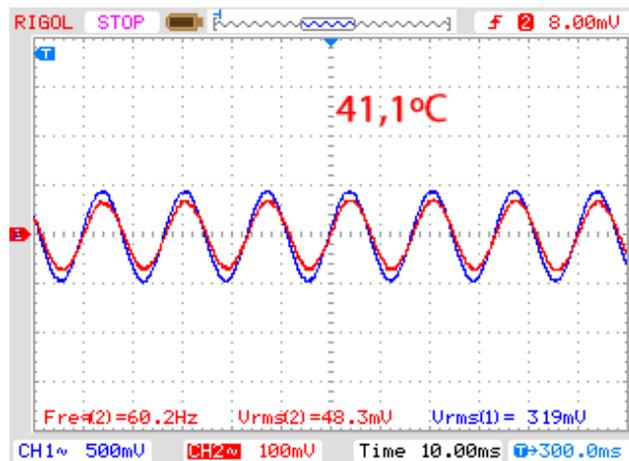


Figura 5.10: Resposta do sensor optomagnético (em vermelho) e da pinça de corrente AC (sinal azul) para uma corrente elétrica de aproximadamente 320 A_{RMS} e temperatura de 41,1 °C

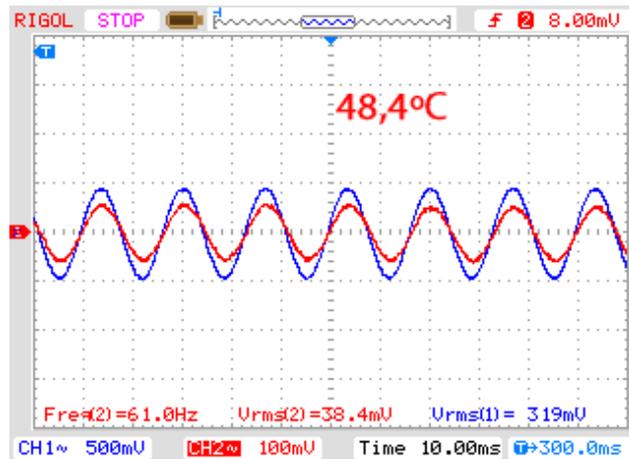


Figura 5.11: Resposta do sensor optomagnético (em vermelho) e da pinça de corrente AC (sinal azul) para uma corrente elétrica de aproximadamente 320 A_{RMS} e temperatura de 48,4 °C

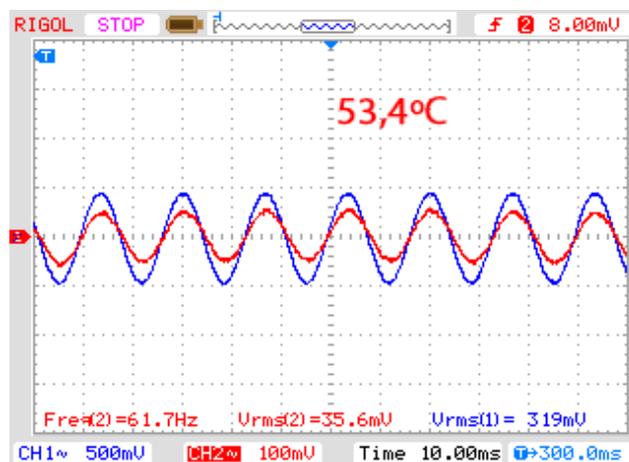


Figura 5.12: Resposta do sensor optomagnético (em vermelho) e da pinça de corrente AC (sinal azul) para uma corrente elétrica de aproximadamente 320 A_{RMS} e temperatura de 53,4 °C

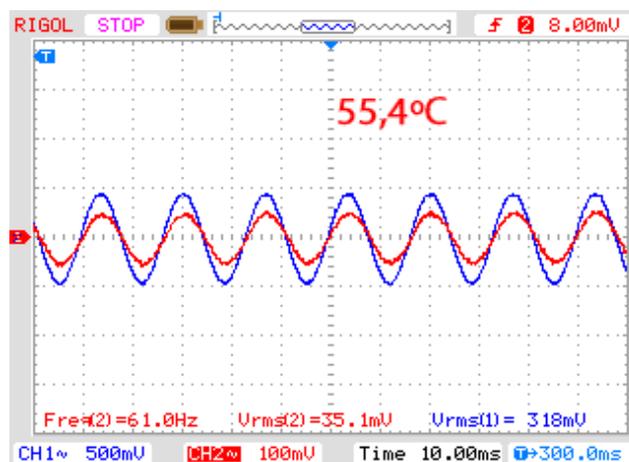


Figura 5.13: Resposta do sensor optomagnético (em vermelho) e da pinça de corrente AC (sinal azul) para uma corrente elétrica de aproximadamente 320 A_{RMS} e temperatura de 55,4 °C

5.5.2 Com Compensação de Temperatura

Agora, entre as Figuras 5.14 e 5.18 são apresentadas as respostas para o ensaio do *set-up* da Figura 4.25, sistema com compensação de temperatura. A temperatura do interior da caixa foi variada em 20,1 °C.

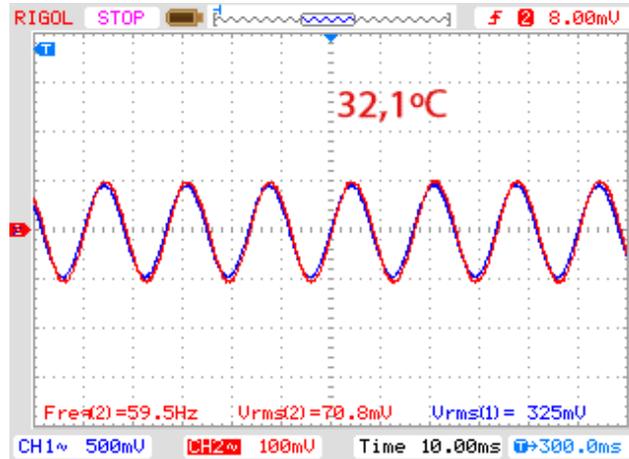


Figura 5.14: Resposta do sensor optomagnético (em vermelho) e da pinça de corrente AC (sinal azul) para uma corrente elétrica de aproximadamente 323 A_{RMS} e temperatura de 32,1 °C

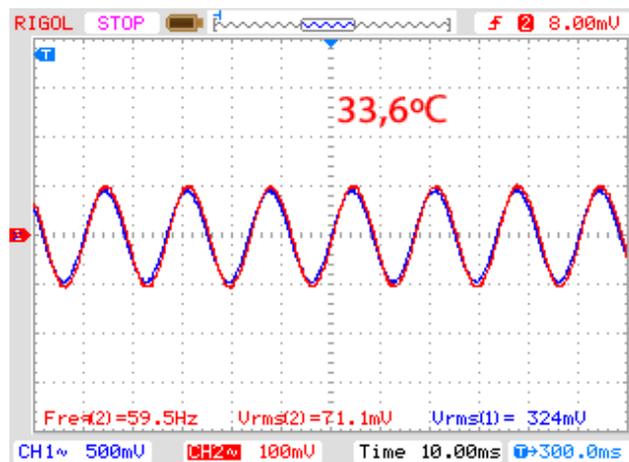


Figura 5.15: Resposta do sensor optomagnético (em vermelho) e da pinça de corrente AC (sinal azul) para uma corrente elétrica de aproximadamente 323 A_{RMS} e temperatura de 33,6 °C

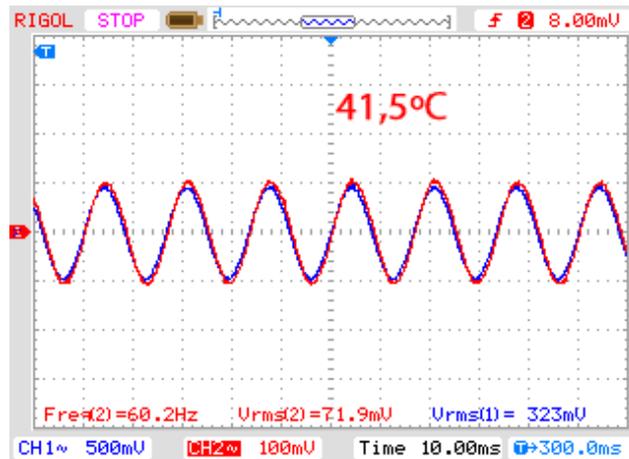


Figura 5.16: Resposta do sensor optomagnético (em vermelho) e da pinça de corrente AC (sinal azul) para uma corrente elétrica de aproximadamente 323 A_{RM}S e temperatura de 41,5 °C

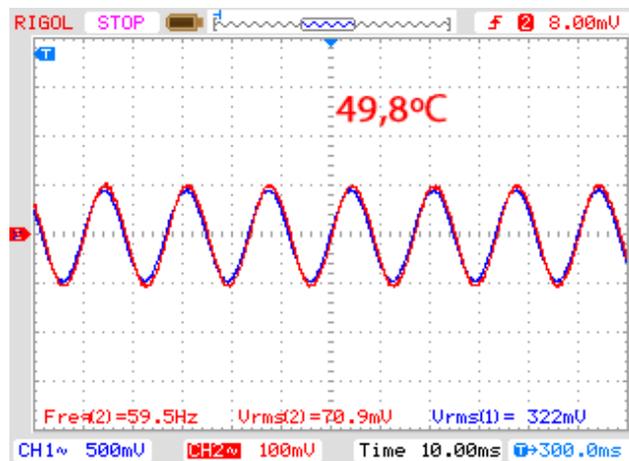


Figura 5.17: Resposta do sensor optomagnético (em vermelho) e da pinça de corrente AC (sinal azul) para uma corrente elétrica de aproximadamente 323 A_{RM}S e temperatura de 49,8 °C

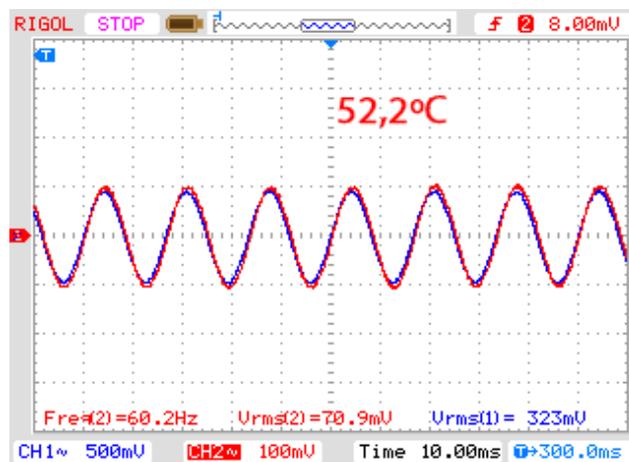


Figura 5.18: Resposta do sensor optomagnético (em vermelho) e da pinça de corrente AC (sinal azul) para uma corrente elétrica de aproximadamente 323 A_{RM}S e temperatura de 52,2 °C

Observa-se, a partir dos resultados obtidos e apresentados entre as Figuras 5.9 e 5.13, que o sinal proveniente do sensor optomagnético, em vermelho, diminui à medida que a temperatura aumenta. Isto ocorreu porque a temperatura no interior da caixa intencionalmente não permaneceu constante durante o ensaio e conseqüentemente as redes de Bragg não deslocaram seus λ_B igualmente. Por exemplo, em determinado momento a diferença de temperatura entre as redes chegou a 2,1 °C, com isso, os espectros das redes de Bragg sensora e filtro fixo saíram de suas posições ideais, isto é, do ponto ótimo de operação e a convolução diminuiu.

Já entre as Figuras 5.14 e 5.18, observa-se que o sinal proveniente do sensor optomagnético não diminuiu com o aumento da temperatura e sua amplitude manteve-se em aproximadamente 71,1 mV em todo o ensaio, além de ter permanecido sobreposto ao sinal da pinça de corrente de referência, em azul. As redes de Bragg foram submetidas à mesma variação de temperatura no interior da caixa de papel e seus λ_B deslocaram-se igualmente, permitindo que os espectros permanecessem no ponto ótimo de operação da convolução e conseqüentemente que a compensação da temperatura do sistema fosse alcançada.

5.6 Linearidade

A Figura 5.19 apresenta o gráfico da tendência de linearidade do sistema gerado a partir dos dados da Tabela 5.3.

Tabela 5.3: Tensão de saída (RMS) x Corrente elétrica

| Tensão de Saída (mV) | Corrente (A) |
|-----------------------------|---------------------|
| 1,65 | 20 |
| 5,53 | 60,5 |
| 9,93 | 102 |
| 20,70 | 198 |
| 36,60 | 302 |
| 47,00 | 400 |
| 60,40 | 499 |
| 76,20 | 604 |
| 91,60 | 699 |
| 107,00 | 801 |

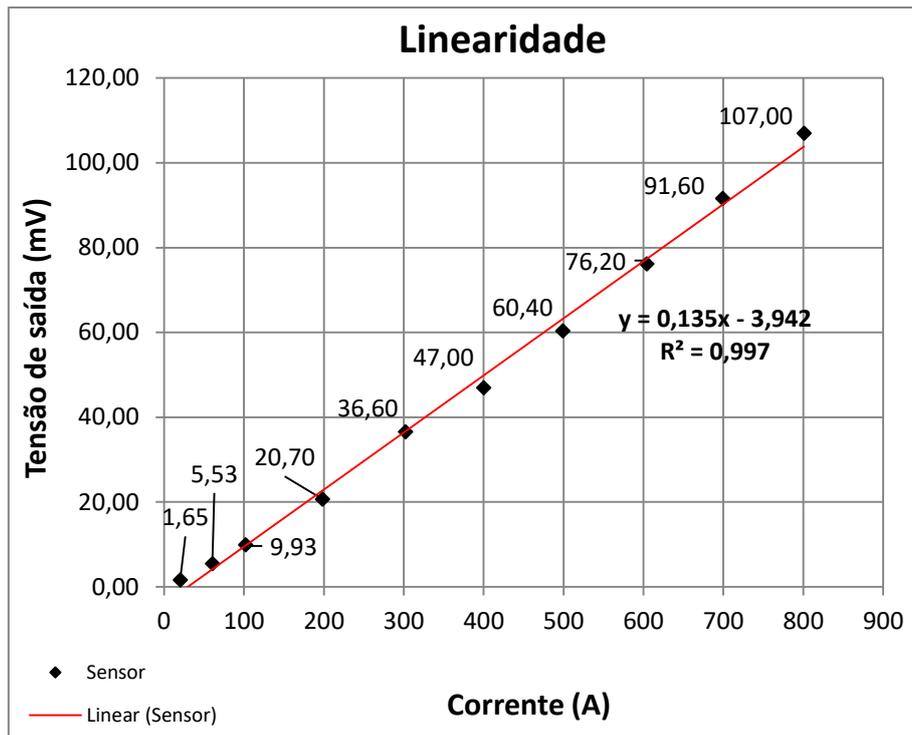


Figura 5.19: Tensão de saída x Corrente elétrica – Linearidade

Observando o gráfico nota-se que o coeficiente de correlação linear foi de 0,997, conferindo ao sensor confiabilidade em suas medidas.

5.7 Transformada Rápida de Fourier e Distorção Harmônica Total

Na Figura 5.20 são apresentadas as amplitudes das harmônicas até a décima quinta ordem, 900 Hz, obtidas a partir do Matlab para o ensaio com compensação de temperatura.

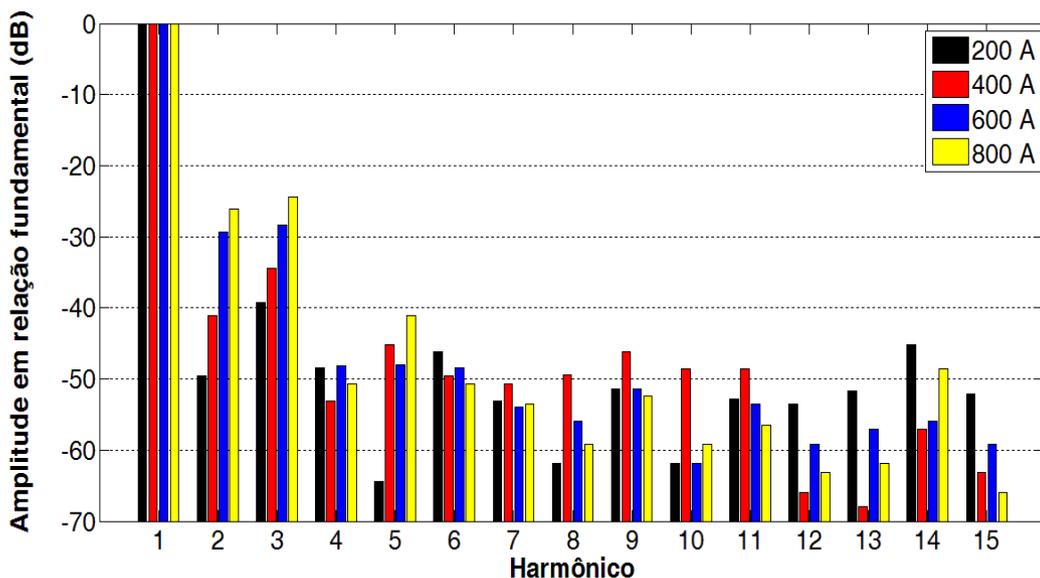


Figura 5.20: Amplitude das harmônicas em relação a fundamental x Harmônico

As harmônicas podem ser classificadas como ímpares e pares, sendo as primeiras geralmente causadas pelas variações da rede de alimentação, como consequência da circulação de correntes distorcidas devido à instalação e cargas não-lineares, e as pares aparecem no caso de assimetrias entre os semiciclos positivo e negativo [9]. Como pode ser observado, em alguns momentos as harmônicas pares tiveram amplitudes superiores às ímpares. O emprego de duas redes de Bragg, a presença de não-linearidades em seus espectros de reflexão e o *ripple* espectral da potência óptica do ASE justificam as assimetrias que causam as harmônicas pares no sinal de saída do sistema, como pode ser constatado na Figura 5.21, a qual apresenta a resposta do sensor optomagnético para a corrente elétrica de aproximadamente 800 A_{RMS}.

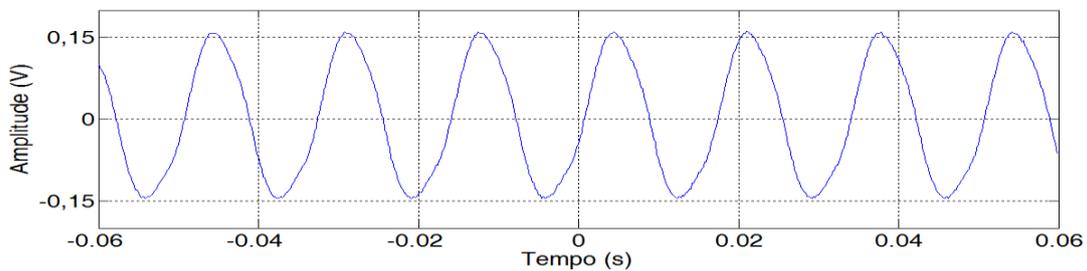


Figura 5.21: Resposta do sensor optomagnético para uma corrente elétrica de aproximadamente 800 A_{RMS}

Após o cálculo das amplitudes das harmônicas foi realizado o cálculo da THD para diferentes amplitudes de corrente elétrica estabelecidas no sistema de injeção de corrente (de 20 a 800 A_{RMS}). Os valores são apresentados na Tabela 5.4 e foram obtidos a partir do diagrama de blocos do Simulink da Figura 4.27.

Tabela 5.4: THD por corrente elétrica do sistema

| Sensor Optomagnético | | Pinça | |
|-----------------------------|---------|--------------|---------|
| Corrente (A) | THD (%) | Corrente (A) | THD (%) |
| 20 | 15,8 | 20 | 7,194 |
| 60 | 3,809 | 60 | 2,765 |
| 100 | 3,456 | 100 | 3,014 |
| 200 | 2,317 | 200 | 2,301 |
| 300 | 3,216 | 300 | 2,79 |
| 400 | 3,325 | 400 | 2,202 |
| 500 | 3,8 | 500 | 2,084 |
| 600 | 5,398 | 600 | 2,068 |
| 700 | 6,658 | 700 | 2,375 |
| 800 | 7,924 | 800 | 3,146 |

Analisando a tabela é possível observar que os valores da THD do sensor optomagnético são superiores aos da pinça de referência, consequência da influência das harmônicas pares naqueles. Além disso, a partir da amplitude de 600 A a THD torna-se mais elevada, resultado da maior oscilação e excursão, entre perfis não-lineares, do espectro da rede de Bragg sensora no espectro da rede filtro fixo. Já o alto valor de THD para 20 A deve-se à baixa resolução dos equipamentos de medição para medidas de baixa amplitude.

Capítulo 6

Conclusões e Trabalhos Futuros

6.1 Conclusões

O presente trabalho objetivou e alcançou a compensação de temperatura para um sensor optomagnético de corrente elétrica com redes de Bragg gêmeas fixadas à hastes de Terfenol-D via resina fotopolimerizável.

O projeto incluiu um aprimoramento na proposta implementada por NAZARÉ [3], onde o autor desenvolveu um sensor optomagnético de corrente elétrica para linhas de transmissão compacto e prático, o qual é capaz de recuperar a senóide completa do sinal de corrente que está sendo conduzido pela linha através de um arranjo que é excitado por campos magnéticos DC e AC.

Para alcançar a compensação de temperatura foi empregada uma segunda rede de Bragg, chamada filtro fixo, fixada à outra haste de Terfenol-D. Esta rede atua como um filtro espectral da rede de Bragg sensora e possibilitou a eliminação dos efeitos da variação térmica do ambiente sobre o sinal de saída do sistema, uma vez que o λ_B também varia em função da temperatura. Enquanto o λ_B do conjunto da rede de Bragg sensora sofreu variações de *strain* devido ao campo magnético externo, o conjunto da rede de Bragg filtro fixo manteve-se fixo interrogando a resposta espectral da primeira. Portanto, o sinal de saída do sistema consiste na convolução dos espectros de reflexão das duas redes de Bragg.

Além disso, para fixação das redes de Bragg às hastes magnetostrictivas foi empregada uma resina fotoativada por um fotopolimerizador LED. Tal procedimento além de propiciar uma maior e melhor fixação quando comparado ao adesivo de cianoacrilato, permite operação em ambientes de temperaturas elevadas, acima de 120 °C.

Com os ensaios realizados em laboratório foi possível traçar a linha de tendência de linearidade do sistema, obtendo valores de coeficientes de correlação linear na ordem de 0,997 e 0,995, o que confere ao sensor confiabilidade em suas medidas.

O resultado do cálculo da FFT e da THD mostrou que há assimetrias entre os semiciclos positivo e negativo do sinal de saída do sistema como consequência da presença de harmônicos pares. Tal fato justifica-se pelo emprego de duas redes de Bragg,

a presença de não-linearidades em seus espectros de reflexão e o *ripple* espectral da potência óptica do ASE.

Em comparação com sistemas de medição de corrente elétrica, o sistema implementado neste trabalho possui as vantagens de: realizar a compensação de temperatura e possuir melhor fixação da rede de Bragg à peça magnetostrictiva (em relação a NAZARÉ [3]); possuir montagem experimental mais simples quando comparado, por exemplo, com YAO [23] e ZHAO [25], onde inclusive este último requer dois circuitos de polarização permanente e um circuito magnético para cada haste de Terfenol-D; recuperar a senóide completa do sinal de corrente elétrica que flui no condutor, fato este evitado, por exemplo, em CREMONEZI [26] e MORA [30]. Além disso, em CREMONEZI [26], apesar do sistema apresentar uma técnica inovadora de utilização de um material magnetostrictivo na forma toroidal, esta mesma forma é complexa de ser fabricada ou encontrar mão de obra qualificada que remodele uma haste pre existente.

6.2 Trabalhos Futuros

Objetivando a continuidade nas pesquisas e conseqüentemente um aprimoramento deste trabalho, alguns aspectos devem ser estudados futuramente.

O primeiro aspecto é estudar novos perfis de espectros de reflexão de redes de Bragg sensora e filtro fixo tais que a amplitude de corrente elétrica aplicada ao sensor não seja deteriorada devido à não-linearidades. Esta melhoria poderá incluir aumento do FWHM (*Full Width at Half Maximum*) de ambas redes de Bragg e supressão de seus lóbulos laterais, contribuindo assim para a diminuição da THD e permitindo ao sensor atender futuramente às normas vigentes.

Além do estudo de novos perfis de espectros de reflexão, outro aspecto que pode ser explorado é a construção de um sistema de interrogação optoeletrônico que permita melhor relação sinal-ruído, maior resolução da medida e compensação automática das flutuações da potência óptica do ASE, como implementado por [20].

Finalmente, é de interesse dos autores tornar possível a implementação dessa tecnologia em campo de forma que ela possa ser futuramente comercializada.

Referências Bibliográficas

- [1] ULMER Jr., E. A., "A High-Accuracy Optical Current Transducer for Electric Power Systems", **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 5, n. 2, pp. 892-898, Abril 1990.
- [2] LEE, B., "Review of the present status of optical fiber sensors", **Optical Fiber Technology**, n. 9, pp. 57–79, 2003.
- [3] NAZARÉ, F. V. B., 2014, *Sensor Opto-Magnético de Corrente Elétrica para Linhas de Transmissão*. Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- [4] M. M. Werneck, *Transdutores e Interfaces*, Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora, 1996.
- [5] HILL, K. O., MELTZ, G., "Fiber Bragg Grating Technology Fundamentals and Overview," **Journal of Lightwave Technology**, vol. 15, no. 8, pp. 1263-1276, Agosto 1997.
- [6] NAZARÉ, F. V. B., WERNECK, M. M., "Compact Optomagnetic Bragg-Grating-Based Current Sensor for Transmission Lines", **IEEE Sensors Journal**, v. 15, n. 1, pp. 100-109, Janeiro 2015.
- [7] SOARES, L. M. B., 2015, *Fibras ópticas com cavidades Fabry-Perot para sensoriamento de temperatura, deformação longitudinal e campo magnético*. Dissertação de M.Sc., Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- [8] SATPATHI, D., MOORE, J. A., ENNIS, M. G., "Design of a Terfenol-D Based Fiber-Optic Current Transducer", **IEEE Sensors Journal**, v. 5, n. 5, pp. 1057-1065, Outubro 2005.
- [9] GONÇALVES, M. N., 2015, *Transformador de potencial óptico com divisor capacitivo para linhas de distribuição de 13,8 kV*. Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- [10] HILL, K. O., FUJII, Y., JOHNSON, D. C., *et al.*, "Photosensitivity in optical fiber waveguides: Application to reflection filter fabrication", **American Institute of Physics**, v. 32, n. 10, pp. 647-649, Maio 1978.

- [11] OTHONOS, A., KALLI, K., **Fiber Bragg Gratings: Fundamentals and Applications in Telecommunications and Sensing**. Boston, Artech House Publishers, 1999.
- [12] OLIVEIRA, R. P., 2009, *Sensor Monoponto de Temperatura Baseado em Redes de Bragg Gêmeas*. Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- [13] MELTZ, G., MOREY, W. W., GLENN, W. H., "Formation of Bragg gratings in optical fibers by a transverse holographic method", **Optics Letters**, v. 14, n. 15, pp. 823-825, Agosto 1989.
- [14] ALLIL, R. C. S. B., 2010, *Sensores a fibra óptica com tecnologia FBG para medida de temperatura e alta tensão*. Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- [15] BARBOSA, C. L., RABELO, R. C., LISBÔA O., *et al.*, "Fabricação e caracterização de grades de Bragg através do uso da técnica da máscara de fase", **Revista Científica Periódica - Telecomunicações**, v. 3, n. 2., pp. 22-26, Dezembro 2000.
- [16] CLARK, A., HATHAWAY, K., **Physics of Giant Magnetostriction**. San Diego, Academic Press, 2000.
- [17] OLABI, A. G., GRUNWALD, A., "Design and application of magnetostrictive materials", **Materials and Design** **29**, pp. 469-483, 2008.
- [18] Terfenol-D Datasheet – ETREMA, Inc. Disponível em <http://www.etrema-usa.com/documents/Terfenol.pdf>. Acesso em 23 de Janeiro 2016.
- [19] RIBEIRO, B. A., 2015, *Compensação de temperatura em um sensor óptico-elétrico para medidas de tensão em linhas de transmissão*. Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- [20] DANTE, A., 2016, *Módulo sensor óptico com grades de Bragg em fibra óptica e cerâmicas piezoelétricas para medida de alta tensão com transformadores de potencial*. Tese de D.Sc., Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, Brasil.
- [21] LI, B., LI, L., "An Overview of the Optical Current Sensor", **2012 International Conference on Computer Science and Electronics Engineering**, Hangzhou, China, 23-25 Março 2012.

- [22] LIMA, D. K., 2009, *Transformadores para instrumentos ópticos: aspectos da viabilidade do seu uso pelas empresas do setor elétrico brasileiro*. Dissertação de M.Sc., Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil.
- [23] YAO, Y., ZHOU, C., ZHANG, W., *et al.*, "A fiber Bragg grating direct current sensor with temperature compensation based on electromagnetic force", **Advances in Mechanical Engineering**, pp. 1-10, 2015.
- [24] FUSIEK, G., NIEWCZAS, P., "Laboratory investigation of an intensiometric dual FBG-based hybrid voltage sensor", **24th International Conference on Optical Fibre Sensors**, v. 9634, Curitiba, PR, Brasil, 18 2015.
- [25] ZHAO, H., SUN, F., YANG, Y., *et al.*, "A novel temperature-compensated method for FBG-GMM current sensor", **Optics Communications**, v. 308, pp. 64-69, 2013.
- [26] CREMONEZI, A. O., FERREIRA, E. C., FILHO, A. J. B., *et al.*, "A Fiber Bragg Grating RMS Current Transducer Based on the Magnetostriction Effect Using a Terfenol-D Toroidal Shaped Modulator", **IEEE Sensors Journal**, v. 13, n. 02, pp. 683-690, Fevereiro 2013.
- [27] DIAS, J. A. S., LEITE, R. L., FERREIRA, E. C., "Electronic technique for temperature compensation of fibre Bragg gratings sensors", **Internacional Journal of Electronics and Communications**, v. 62, pp. 72-76, 2008.
- [28] MORA, J., DÍEZ, A., CRUZ, J. L., *et al.*, "A Magnetostrictive Sensor Interrogated by Fiber Gratings for DC-Current and Temperature Discrimination", **IEEE Photonics Technology Letters**, v. 12, n. 12, pp. 1680-1682, Dezembro 2000.
- [29] CHIANG, K. S., KANCHETI, R., RASTOGI, V., "Temperature-compensated fiber-Bragg-grating-based magnetostrictive sensor for DC and AC currents", **Optical Engineering**, v. 42, n. 07, pp. 1906-1909, 2003.
- [30] MORA, J., MARTÍNEZ-LEÓN LI, DÍEZ, A., *et al.*, "Simultaneous temperature and ac-current measurements for high voltage lines using fiber Bragg gratings", **Sensors and Actuators A**, v. 125, pp. 313-316, 2006.
- [31] REILLY, D., WILLSHIRE, A. J., FUSIEK G., *et al.*, "A Fiber-Bragg-Grating-Based Sensor for Simultaneous AC Current and Temperature Measurement", **IEEE Sensors Journal**, v. 6, n. 6, pp. 1539-1542, Dezembro 2006.

- [32] YI, B., CHU, B. C. B., CHIANG, K. S., "Temperature Compensation for a Fiber-Bragg-Grating-Based Magnetostrictive Sensor", **Microwave and Optical Technology Letters**, v. 36, n. 3, pp. 211-213, Fevereiro 2003.
- [33] ASM Ready Reference, "Thermal Properties of Metals". *ASM Materials Data Series*, ASM International, 2002.
- [34] DANTE, A., BACURAU, R. M., SPENGLER, A. W., *et al.*, "A Temperature-Independent Interrogation Technique for FBG Sensors Using Monolithic Multilayer Piezoelectric Actuators", **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, v. 65, n. 11, pp. 2476-2484, Novembro 2016.
- [35] INNOVA FreD Features & Benefits – Coherent. Disponível em <https://www.coherent.com/lasers/laser/innova-fred>. Acesso em 22 Fevereiro 2017.
- [36] Poly 600 Características Técnicas – KaVo. Disponível em <http://www.kavo.com/pt-br/perifericos/poly-600>. Acesso em 24 Outubro 2016.
- [37] Fonte de luz banda larga (ASE) e Circulador Óptico, Dados Técnicos – OptoLink. Disponível em <http://www.optolink.com.br>. Acesso em 2 Fevereiro 2016.
- [38] PDA10CS InGaAs Switchable Gain Detector User Guide – Thorlabs. Disponível em <https://www.thorlabs.com>. Acesso em 1 Março 2016.
- [39] Variadores de Voltagem Monofásicos 220 V 50/60 Hz – Auje. Disponível em <http://www.auje.com.br>. Acesso em 1 Março 2016.
- [40] Variador de Tensão Modelos TDGC e TSGC, Dados Técnicos – JNG. Disponível em <http://www.jng.com.br>. Acesso em 1 Março 2016.
- [41] Pinça de Corrente CA i2000 flex – Fluke. Disponível em <http://www.fluke.com>. Acesso em 22 Maio 2016.
- [42] Manually Adjustable Polarization Insensitive Tunable Filters – OZ Optics Limited. Disponível em http://www.ozoptics.com/ALLNEW_PDF/DTS0051.pdf. Acesso em 23 02 2016.
- [43] Static Optical Sensing Interrogator sm125 – Micron Optics. Disponível em <http://www.micronoptics.com/wp-content/uploads/2017/03/sm125.pdf>. Acesso em 28 Fevereiro 2017.

[44] Termômetro / Registrador de dados em 4 canais, Modelo SDL200 – Extech Instruments. Disponível em http://www.extech.com/resources/SDL200_UMpt.pdf. Acesso em 21 10 2016.