



TRANSFORMADOR DE POTENCIAL ÓPTICO TERMICAMENTE  
COMPENSADO PARA MEDIDAS DE QUALIDADE DE ENERGIA

Marceli Nunes Gonçalves

Tese de doutorado 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 Doutor em Engenharia Elétrica.

Orientador: Marcelo Martins Werneck

Rio de Janeiro

Julho de 2021

TRANSFORMADOR DE POTENCIAL ÓPTICO TERMICAMENTE  
COMPENSADO PARA MEDIDAS DE QUALIDADE DE ENERGIA

Marceli Nunes Gonçalves

TESE 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 DOUTOR EM  
CIÊNCIAS EM ENGENHARIA ELÉTRICA.

Orientador: Marcelo Martins Werneck

Aprovada por: Prof. Marcelo Martins Werneck

Prof. Djalma Mosqueira Falcão

Prof<sup>a</sup>. Maria José Pontes

Prof. Ricardo Marques Ribeiro

Dr. Alex Dante

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

JULHO DE 2021

Gonçalves, Marcell Nunes

Transformador de Potencial Óptico Termicamente Compensado para Medidas de Qualidade de Energia / Marcell Nunes Gonçalves – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2021.

XV, 78 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Marcelo Martins Werneck

Tese (doutorado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Elétrica, 2021.

Referências Bibliográficas: p. 74-78.

1. Transformador de potencial óptico. 2. Qualidade de energia. 3. Variações de tensão de curta duração. 4. Rede de Bragg. 5. FBG. 6. Cerâmicas piezoelétricas. 7. Sensor de tensão. I. Werneck, Marcelo Martins. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Elétrica. III. Título.

*Para minha querida mãe  
Débora Nunes Gonçalves.*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela oportunidade de seguir meus estudos com saúde, mesmo em tempos de pandemia, e por me abençoar com familiares e amigos tão especiais que estiveram ao meu lado durante todos meus anos de doutorado.

Agradeço minha família, que apoiou meus estudos desde o ensino médio, até chegar a graduação, mestrado e agora ao doutorado. Obrigada pela compreensão das horas ausente, longe da minha cidade natal e perda de eventos importantes. Todas essas horas não foram em vão e este é o resultado de tanto trabalho.

Débora Nunes Gonçalves, você foi o pilar fundamental para que eu não desistisse do meu objetivo de ser doutora, sem você eu não teria conseguido finalizar esse trabalho, obrigada por tudo. Agradeço também pelo suporte dos meus irmãos Wivian Nunes Gonçalves de Oliveira, Maria Alice Nunes Gonçalves dos Santos e Witor Edson Gonçalves de Oliveira.

Agradeço aos meus tios e tias, minha madrinha, meu padrinho e minha avó por estarem ao meu lado por todos os cinco anos de estudo do doutorado, sempre me motivando a seguir em frente e me ajudando a chegar no meu objetivo final. A conclusão dessa tese é um marco na minha trajetória pessoal e o carinho e amor de vocês foram fundamentais para concluir esse desafio.

Também agradeço ao meu gestor e amigo Diego Guimarães Ramos, por ter abraçado comigo meu objetivo e me dado todas as ferramentas possíveis para que eu conseguisse estudar e trabalhar ao mesmo tempo. Agradeço aos meus amigos e colegas de trabalho que apoiaram e suportaram minhas entregas profissionais, enquanto eu me dedicava aos estudos, em especial ao Bernardo Emil Bauer.

Agradeço aos meus amigos e amigas de Volta Redonda e aos que construí no Rio de Janeiro ao longo dos 13 anos que mudei de cidade. Nos meus momentos de fragilidade, longe de casa durante a pandemia, vocês estiveram ao meu lado e cuidaram de mim como se fossem minha família. Um agradecimento especial a Thalita Lopes Rodrigues, Carolina da Costa Lázaro e Mônica Andrade Portella de Araujo.

Agradeço à equipe do Laboratório de Instrumentação e Fotônica, por me auxiliarem em meus experimentos e em todos os desafios técnicos que surgiram durante meu período de estudos no LIF, especialmente ao Alex Dante. Também agradeço ao Rodrigo Emanuel Barros, por mesmo não sendo mais parte da equipe do LIF, ter continuado trocando as experiências acadêmicas comigo e partilhado os desafios da jornada de se tornar doutor.

Por fim, agradeço ao meu orientador Marcelo Martins Werneck por acreditar no meu tema de tese e na minha capacidade de desenvolver essa pesquisa. Obrigada por compreender minha divisão entre trabalho e estudo e pelas horas de apoio nos experimentos, nas discussões de resultado e na revisão dos textos.

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

## TRANSFORMADOR DE POTENCIAL ÓPTICO TERMICAMENTE COMPENSADO PARA MEDIDAS DE QUALIDADE DE ENERGIA

Marceli Nunes Gonçalves

Julho/2021

Orientador: Marcelo Martins Werneck

Programa: Engenharia Elétrica

O presente trabalho consiste no desenvolvimento de um transformador de potencial óptico (TPO) para medidas de qualidade de energia. Para compor o transformador de potencial foram utilizadas cerâmicas piezoelétricas, que sofrem mudanças em suas dimensões sob efeito de um campo elétrico. Uma rede de Bragg em fibra óptica foi utilizada como elemento sensor para medir tais variações.

No entanto, a rede de Bragg é um sensor capaz de medir variações de deformação e de temperatura, o que compromete as medidas das variações das cerâmicas. Portanto, um método passivo de compensação de temperatura foi empregado, testado e validado, evitando comprometer a exatidão e repetibilidade nas medidas do transformador.

O transformador óptico termicamente compensado foi ensaiado em laboratório em tensões de até  $4kV_{RMS}$  com variações de tensão de curta duração (VTCD), um dos distúrbios mais significantes que se manifestam nas redes elétricas comprometendo sua qualidade. Foi avaliada a resposta do transformador a interrupções, afundamentos e elevações de tensão.

O uso de TPOs baseados em redes de Bragg e cerâmicas piezoelétricas para medidas de qualidade de energia ainda não foi discutido na literatura. Os resultados obtidos demonstram que o transformador consegue reproduzir os defeitos ensaiados sem introduzir distorções significativas.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science (D.Sc.)

## TEMPERATURE-INDEPENDENT OPTICAL VOLTAGE TRANSFORMER FOR POWER QUALITY MEASUREMENTS

Marceli Nunes Gonçalves

July/2021

Advisor: Marcelo Martins Werneck

Department: Electrical Engineering

This work presents the development of an Optical Voltage Transformer (OVT) for power quality measurements. The Voltage Transformer consists of a stack of piezoelectric ceramics, which experiences a mechanical strain when an electrical field is applied to it. A Fiber Bragg Grating (FBG) is used in order to measure the resulting ceramic strain.

The FBG is a sensor capable of measuring strain and temperature variations, which compromises the measurements of ceramic strain. Therefore, a passive temperature compensation method was employed, tested and validated in order to not to compromise the accuracy and repeatability of transformer measurements.

The Optical Transformer was tested in the laboratory at voltages up to 4 kV<sub>RMS</sub> with short duration voltage variations, one of the most significant power quality disturbances in medium voltage networks. The transformer response was evaluated for interruptions, sags and swells.

Optical Voltage Transformers based on FBG and piezoelectric ceramics for power quality measurements has not yet been discussed in the literature. The results prove the transformer is able to reproduce the disturbances without introducing significant distortions.

# ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	Motivação e relevância do tema.....	1
1.2	Objetivo.....	3
1.3	Organização.....	3
2	FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	5
2.1	Qualidade de energia.....	5
2.1.1	<i>Principais distúrbios associados a qualidade de energia</i> .....	6
2.2	Redes de Bragg.....	10
2.2.1	<i>Sensibilidade da FBG em relação à deformação e temperatura</i> .....	11
2.2.2	<i>Interrogação de Redes de Bragg</i> .....	12
2.3	Cerâmicas Piezoelétricas.....	15
2.3.1	<i>Fundamentos da piezoeletrecidade</i> .....	15
2.3.2	<i>Propriedades das cerâmicas piezoelétricas</i> .....	16
2.4	Princípio de funcionamento de um sensor de tensão FBG-PZT.....	20
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	22
3.1	Redes de Bragg e cerâmicas piezoelétricas para medidas de tensão.....	22
3.2	Compensação de temperatura em sensores FBG.....	23
3.3	Medidas de qualidade de energia com TPOs.....	27
4	COMPENSAÇÃO PASSIVA DE TEMPERATURA.....	29
4.1	Princípio do sistema de compensação passiva.....	29
4.2	Arranjo mecânico do transformador.....	30
4.3	Dimensionamento dos materiais para compensação.....	32
4.4	Ajuste dos componentes do transformador.....	37
5	MEDIDAS DE TENSÃO E SEUS DISTÚRBIOS.....	40
5.1	Máxima tensão de operação.....	40
5.2	Sensibilidade da FBG relação a tensão de entrada.....	41
5.3	Relação entrada-saída do TPO.....	42
5.4	Modelo para medidas dos distúrbios de tensão.....	43
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	46
6.1	Ensaio da compensação de temperatura.....	46
6.2	Ensaio do TPO com tensão CA.....	47

6.3	Ensaio do TPO sob variações de tensão de curta duração .....	51
6.3.1	<i>Afundamento de tensão</i> .....	51
6.3.2	<i>Elevação de tensão</i> .....	61
6.3.3	<i>Interrupção de tensão</i> .....	64
6.4	Resposta em frequência do TPO .....	67
7	CONCLUSÃO.....	71
7.1	Trabalhos futuros.....	72
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	74

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Cadeia de medição de qualidade de energia, adaptado de [1].....	1
Figura 2.1 – Principais distúrbios associados à qualidade de energia elétrica [17].....	6
Figura 2.2 – Interação de uma rede de Bragg com uma luz incidente. ....	10
Figura 2.3 – Interrogação de uma FGB utilizando um OSA. ....	13
Figura 2.4 – Espectro óptico refletido por uma FBG visualizado no OSA. ....	13
Figura 2.5 – Demodulação de uma FBG utilizando filtro Fabry-Perot. ....	14
Figura 2.6 – Estrutura Perovskita (a) Material centrossimétrico (b) Material não centrossimétrico [24]. ....	16
Figura 2.7 – Direção das forças que afetam uma cerâmica piezoelétrica, adaptado de PI CERAMICS [25]. ....	17
Figura 2.8 – Deslocamento (a) paralelo a P e (b) ortogonal a P de um material PZT, onde P é o vetor de indica a direção de polarização da cerâmica e F indica a força aplicada [26]. ....	17
Figura 2.9 – Cerâmica PZT em formato anel. ....	18
Figura 2.10 – Circuito equivalente de uma cerâmica PZT. ....	19
Figura 2.11 – Propriedades das cerâmicas PZT do fabricante <i>Sparkler Ceramics</i> [27].	20
Figura 2.12 – Princípio de funcionamento de um sensor de tensão FBG-PZT. ....	21
Figura 3.1 – Compensação de temperatura de um TCO empregando duas FBGs [29].	25
Figura 3.2 – Compensação de temperatura de um TPO empregando duas FBGs [10].	26
Figura 4.1 – Vista superior da estrutura do TPO. ....	31
Figura 4.2 – Comprimentos dos elementos do TPO. ....	32
Figura 4.3 – Especificações técnicas do parafusos (a) Parafuso 1 e (b) Parafuso 2. ....	37
Figura 4.4 – Procedimento de fixação da FBG. ....	38
Figura 4.5 – FBG colada e esticada entre os parafusos. ....	39
Figura 4.6 – Comprimento de onda de Bragg antes e após esticar a FBG. ....	39
Figura 5.1 – Diagrama das etapas para aplicar os distúrbios de tensão no TPO. ....	43
Figura 5.2 – Modelo para simulação de variações de tensão de curta duração. ....	44
Figura 5.3 – Falta fase-terra que ocasiona um afundamento de tensão. ....	45
Figura 5.4 – Falta fase-fase ocasionando uma elevação de tensão. ....	45
Figura 5.5 – Falta fase-fase com terra ocasionando uma interrupção de tensão. ....	45
Figura 6.1 – Ensaio para validação da compensação de temperatura. ....	46
Figura 6.2 – Comprimento de onda de Bragg durante variação de temperatura. ....	47
Figura 6.3 – <i>Setup</i> experimental para medidas de alta tensão. ....	48

Figura 6.4 – Transformador de Potencial Óptico na sala de alta tensão. ....	49
Figura 6.5 – (a) Tensão de saída gerador (CH1) e tensão de saída do amplificador (CH2), (b) Tensão de entrada do transformador óptico.....	50
Figura 6.6 – Comprimento de onda de Bragg para uma tensão de entrada igual a 4,1 kV <sub>RMS</sub> .....	50
Figura 6.7 – Tensão no barramento de 220 V durante o afundamento. ....	51
Figura 6.8 – Tensão na fase A durante o afundamento. ....	52
Figura 6.9 – Comprimento de onda de Bragg durante o afundamento de tensão.....	53
Figura 6.10 – <i>Setup</i> experimental incluindo sistema de interrogação. ....	54
Figura 6.11 – Sistema de interrogação baseado em filtro Fabry-Perot. ....	55
Figura 6.12 – Espectro óptico da fonte de banda larga, visualizado no OSA. ....	55
Figura 6.13 – Espectro óptico da FBG, visualizado no OSA. ....	56
Figura 6.14 – Espectro óptico do filtro Fabry-Perot, visualizado no OSA. ....	57
Figura 6.15 – Espectro da interseção entre o sinal refletido pela FBG e a transmitância do filtro Fabry-Perot, visualizado no OSA.....	57
Figura 6.16 – Tensão na fase A durante segundo ensaio de afundamento de tensão....	58
Figura 6.17 – Tensão de entrada (CH1) e tensão de saída do amplificador (CH2) durante o segundo ensaio de afundamento de tensão. ....	58
Figura 6.18 – Tensão de entrada do TPO (CH1) e tensão de saída do TPO (CH2) durante o segundo ensaio de afundamento de tensão. (a) Distúrbio completo, (b) Início do distúrbio, (c) Final do distúrbio. ....	60
Figura 6.19 – FFT da entrada e saída do TPO durante o afundamento de tensão.....	60
Figura 6.20 – Tensão na fase C durante o ensaio de elevação de tensão. ....	61
Figura 6.21 – Tensão de entrada (CH1) e tensão de saída do amplificador (CH2) durante a elevação de tensão. ....	62
Figura 6.22 – Tensão de entrada do TPO (CH1) e tensão de saída do TPO (CH2) durante a elevação de tensão. (a) Distúrbio completo, (b) Início do distúrbio, (c) Final do distúrbio.....	63
Figura 6.23 – FFT da entrada e saída do TPO durante a elevação de tensão.....	64
Figura 6.24 – Tensão na fase A durante ensaio de interrupção de tensão.....	64
Figura 6.25 – Tensão de entrada (CH1) e tensão de saída do amplificador (CH2) durante interrupção de tensão. ....	65

Figura 6.26 – Tensão de entrada do TPO (CH1) e tensão de saída do TPO (CH2) durante a interrupção de tensão. (a) Distúrbio completo, (b) Início do distúrbio, (c) Final do distúrbio.....	66
Figura 6.27 – FFT da entrada e saída do TPO durante a interrupção de tensão.....	67
Figura 6.28 – Tensão de entrada do TPO (CH1) e tensão de saída do TPO (CH2) para frequência de entrada de (a) 60 Hz, (b) 100 Hz, (c) 200 Hz, (d) 400 Hz, (e) 500 Hz, (f) 1 kHz. ....	68
Figura 6.29 – (a) Tensão de saída gerador (CH1) e tensão de saída do amplificador (CH2), (b) Tensão de entrada do TPO (CH1) e tensão de saída do TPO (CH2). ....	69
Figura 6.30 – FFT da entrada e saída do TPO para resposta ao degrau. ....	69
Figura 6.31 – Parte amplificada da FFT da entrada e saída do TPO para resposta ao degrau. ....	70
Figura 7.1 – Proposta de aplicação do TPO em campo com divisor capacitivo. ....	73

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Categorias de classificação dos distúrbios [18].	8
Tabela 2.2 – Características dos principais distúrbios da qualidade de energia [19].	9
Tabela 4.1 – Parâmetros da FBG utilizada no transformador.	30
Tabela 4.2 – Parâmetros dos materiais utilizados na construção do TPO.	33
Tabela 4.3 – Deslocamento dos materiais que compõe o TPO.	34
Tabela 4.4 – Coeficiente de dilatação térmica de alguns materiais.	35
Tabela 4.5 – Nova configuração para os parafusos 1 e 2.	36
Tabela 5.1 – Parâmetros da cerâmica SP-4 [27].	40
Tabela 6.1 – Tensões medidas experimentalmente durante o ensaio de afundamento de tensão.	53
Tabela 6.2 Tensões medidas experimentalmente durante o segundo ensaio de afundamento de tensão.	59
Tabela 6.3 – Tensões medidas experimentalmente durante o ensaio de elevação de tensão.	62
Tabela 6.4 – Tensões medidas experimentalmente durante o ensaio de interrupção de tensão.	65

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica  
CA – Corrente Alternada  
CC – Corrente Contínua  
CTE – Coeficiente de Expansão Térmica  
DCP – Divisor Capacitivo de Potencial  
DEC – Duração equivalente de interrupção por unidade consumidora  
DIC – Duração de interrupção individual por unidade consumidora  
FBG – *Fiber Bragg Grating*  
FFP – Filtro Fabry-Perot  
FFT – *Fast Fourier Transform*  
IEC – *International Electrotechnical Commission*  
IEEE – *Institute of Electrical and Electronic Engineers*  
LIF – Laboratório de Instrumentação e Fotônica  
OSA – *Optical Spectrum Analyzer*  
PZT – *Lead Zirconium Titanate*  
QEE – Qualidade de Energia Elétrica  
RMS – *Root Mean Square*  
SLED – LED Superluminescente  
TC – Transformador de Corrente  
TCO – Transformador de Corrente Óptico  
THD – *Total Harmonic Distortion*  
TI – Transformador de Instrumentação  
TP – Transformador de Potencial  
TPO – Transformador de Potencial Óptico  
VTCD – Variações de Tensão de Curta Duração

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Motivação e relevância do tema

Os transformadores de instrumentação (TIs) são largamente utilizados para fins de medição e proteção, fornecendo um sinal para instrumentos de medição e para o acionamento dos relés de proteção.

Essencialmente, os TIs foram concebidos e fabricados para medição de corrente e tensão, com base em ampla padronização já existente sobre o tema. No entanto, devido ao desenvolvimento tecnológico, principalmente da eletrônica de potência, consumidores e concessionárias de energia elétrica têm se preocupado cada vez mais com a qualidade da energia elétrica (QEE).

Em aplicações de baixa tensão, existem instrumentos capazes de realizar medições de qualidade de energia com alto grau de precisão e em conformidade com as normas. Para aplicações de alta tensão, os transformadores de potencial (TPs) e transformadores de corrente (TCs) devem ser inseridos na cadeia de medição (Figura 1.1) e seus impactos nas medidas devem ser considerados, segundo a IEC 61869-103 [1].

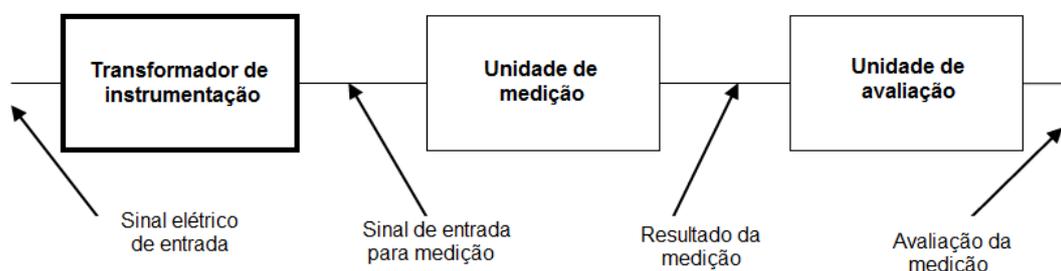


Figura 1.1 – Cadeia de medição de qualidade de energia, adaptado de [1].

Para medidas de tensão, os TPs têm a função de abaixar o nível de tensão entre o ponto a ser medido e a unidade de medição. Idealmente, os TPs não deveriam causar nenhum tipo de alteração no sinal entre a entrada em alta tensão e a saída em baixa, exceto na magnitude. Na prática, os TPs possuem um erro de relação, que determina o quanto o secundário está desviando da tensão primária, além da transformação esperada na magnitude.

Além disso, para frequência nominal, o transformador de potencial apresenta um comportamento homogêneo respeitando o erro esperado determinado na sua classe de exatidão [2]. No entanto, para frequências maiores, o comportamento do transformador pode mudar e seu erro de relação tende a aumentar.

Uma alternativa aos transformadores convencionais que tem despontado nos últimos anos são os transformadores de corrente ópticos (TCOs) e os transformadores de potencial ópticos (TPOs) [3],[4],[5]. Atualmente, os TCOs comercializados no sistema elétrico operam com base no efeito Faraday, enquanto os TPOs baseiam-se no efeito Pockels.

Os transformadores ópticos têm menor peso e volume que os transformadores convencionais, imunidade à interferência eletromagnética, isolamento galvânica devido sua saída em fibra óptica, ampla largura de banda, além da facilidade de integração com as *Smart Grids*.

Novas propostas de TCOs e TPOs baseados em redes de Bragg (FBG – *Fiber Bragg Grating*), um sensor em fibra óptica capaz de medir variações de temperatura e de deformação, tem aparecido na literatura [6]-[15]. Assim como os transformadores ópticos comerciais, esses transformadores realizam a medição de corrente ou tensão a partir da medição do campo magnético ou elétrico.

Os TCOs baseados em FBG relacionam a variação do campo magnético com a deformação induzida na rede de Bragg para realizar as medições de corrente, enquanto os TPOs relacionam o campo elétrico com a deformação na FBG. A variação do campo elétrico pode ser medida através de materiais piezoelétricos, como cerâmicas piezoelétricas, e suas vibrações transferidas para a rede de Bragg.

O uso de TPOs baseados em redes de Bragg e cerâmicas piezoelétricas em substituição aos transformadores convencionais, seja para medição ou proteção, tem sido discutido na literatura ao longo dos últimos anos. Com o advento das *Smart Grids*, o foco em medidores inteligentes para média tensão (13,8 kV a 35 kV) alavancou o desenvolvimento de sensores ópticos para aplicação em distribuição. No entanto, o emprego desses transformadores ópticos para medidas de qualidade de energia ainda não foi explorado.

Resultados obtidos por GONÇALVES [8] mostram que o TPO desenvolvido possui classe de exatidão 0,2, boa repetibilidade e consegue identificar as harmônicas da tensão de entrada. Já ensaios apresentados por YANG *et al.* [11] mostram que o transformador óptico é capaz de medir um sinal triangular e quadrado, além de um sinal senoidal. Por fim, DANTE *et al.* [12] mostram que o seu sensor é capaz de responder a um transiente de tensão. Assim, observou-se que além da utilização em medição e proteção, há uma oportunidade de empregar os TPOs baseados em FBG e cerâmicas piezoelétricas para medidas de qualidade de energia.

Apesar dos bons resultados obtidos, um dos fatores que limitam a aplicação de TPOs baseados em redes de Bragg no sistema elétrico é a influência das variações de temperatura nas medidas de tensão. Uma vez que a FBG também é sensível a esse parâmetro e desejamos medir apenas sua deformação, é necessário empregar uma metodologia de compensação de temperatura, eliminando assim possíveis impactos do nas medidas dos distúrbios de tensão.

## **1.2 Objetivo**

O presente trabalho tem como objetivo projetar e ensaiar um transformador de potencial óptico, baseado em cerâmicas piezoelétricas e redes de Bragg, em diferentes distúrbios de tensão. Além disso, deseja-se que o transformador seja termicamente compensado para não provocar influências nas medidas de tensão.

Para atingir esse objetivo principal, foi necessário segmentá-lo em objetivos mais específicos:

- Construir uma estrutura mecânica para o transformador de forma que a expansão térmica de seus materiais compense a expansão térmica da rede de Bragg e não comprometa as medidas de tensão;
- Validar que o transformador é capaz de medir variações de tensão de curta duração (de 0,5 ciclo a 1 min), sejam elas interrupções, afundamentos ou elevações.

## **1.3 Organização**

Este trabalho está estruturado em sete capítulos dispostos da seguinte forma: no Capítulo 1 são apresentadas as motivações que impulsionaram a proposta dessa tese e apresentada a relevância do tema. Também são apresentados o objetivo do trabalho e como ele está estruturado.

No Capítulo 2 são apresentados os fundamentos teóricos acerca de qualidade de energia, redes de Bragg e cerâmicas piezoelétricas. São descritos os principais distúrbios associados a qualidade de energia e o princípio de funcionamento das redes de Bragg e das cerâmicas piezoelétricas.

No Capítulo 3 é realizada uma revisão da literatura acerca dos principais pontos que serão destacados nesse trabalho, passando pelo uso de FBGs combinadas com materiais piezoelétricos para medidas de tensão, quais metodologias de compensação de temperatura têm sido empregadas nesse tipo de transformadores e resultados recentes que demonstram a oportunidade de realizar medidas de qualidade de energia.

O método de compensação de temperatura passivo utilizado no TPO desse trabalho é apresentado no Capítulo 4. É demonstrado como o arranjo mecânico do transformador foi construído e são apresentados os cálculos para o dimensionamento dos materiais que compõem esse arranjo.

No Capítulo 5 são apresentados os cálculos teóricos para medidas de tensão, como a máxima tensão de operação, a sensibilidade da rede de Bragg em relação a tensão de entrada e relação entrada-saída do transformador. Além disso, o projeto para medidas das variações de tensão é apresentado.

Por fim, no Capítulo 6 são mostrados os resultados dos ensaios de compensação de temperatura e os resultados do transformador operando com tensões CA e sob os seguintes distúrbios de qualidade de energia: afundamento, elevações e interrupções de tensão.

É realizada uma discussão a respeito do trabalho como um todo na conclusão do Capítulo 7, além de destacar o diferencial do estudo e quais os possíveis trabalhos futuros.

## **2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS**

Esse capítulo apresenta os principais conceitos relacionados à qualidade de energia elétrica: sua definição, os principais distúrbios e como eles se classificam. Além disso, também é descrito o princípio de funcionamento básico de uma rede de Bragg e das cerâmicas piezoelétricas.

Os conceitos apresentados neste capítulo formam a base para o entendimento do transformador de potencial óptico FBG-PZT apresentado nesse trabalho e sua aplicabilidade para medição de qualidade de energia.

### **2.1 Qualidade de energia**

O termo qualidade de energia é aplicado para uma variedade de distúrbios nos sistemas elétricos, os quais sempre foram objeto de preocupação das concessionárias e indústrias. O crescente uso de cargas eletrônicas não lineares conectadas à rede colocou o tema ainda mais em foco. Devido aos seus conversores, tais cargas acabam por distorcer a forma de onda que chega até elas, “poluindo” assim a rede.

Por outro lado, os equipamentos utilizados hoje em dia estão mais sensíveis às variações de tensão, pois muitos deles possuem controles baseados em microprocessadores e dispositivos eletrônicos sensíveis a muitos tipos de distúrbios resultando em má operação e, até mesmo, redução de sua vida útil.

No âmbito industrial, tais distúrbios podem afetar a continuidade da operação. Em ramos de atividade como o siderúrgico e petroquímico uma interrupção elétrica de até um minuto pode ocasionar prejuízos importantes devido à paralisação de máquinas, equipamentos e da linha de produção. Para essas indústrias, os reflexos econômicos da qualidade da energia são profundos.

Somado a isso, os consumidores residenciais também têm se informado cada vez mais acerca do tema qualidade de energia e têm cobrado das concessionárias uma melhora no serviço prestado. Os indicadores definidos pela ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) mais conhecidos pelo público são a duração de interrupção individual (DIC) e coletiva (DEC).

A ANEEL, nos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST, Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica [16], define a qualidade da energia como a combinação da qualidade do produto e qualidade do serviço. A qualidade do serviço é medida segundo a continuidade do fornecimento da energia

elétrica, enquanto a qualidade do produto diz respeito à conformidade da tensão em regime permanente e às perturbações na forma de onda de tensão. De forma resumida, para o consumidor final, seja ele industrial ou residencial, a qualidade de energia é dispor do produto de forma contínua e em conformidade com os padrões.

### 2.1.1 Principais distúrbios associados a qualidade de energia

Em 1997, BROZEADO *et al.* [17] resumiram os principais distúrbios associados a qualidade de energia elétrica, destacados na Figura 2.1. Desde então, diversas classificações têm sido empregadas para categorizar tais distúrbios.

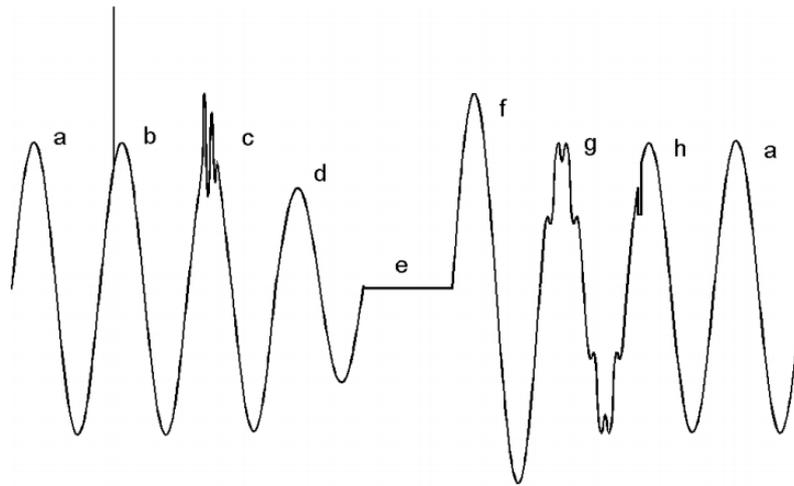


Figura 2.1 – Principais distúrbios associados à qualidade de energia elétrica [17].

a) Tensão normal; b) Surto de Tensão; c) Transitório Oscilatório de Tensão; d) Afundamento Momentâneo; e) Interrupção Momentânea de Tensão; f) Elevação Momentânea; g) Distorção Harmônica; h) Cortes na Tensão.

Os **transitórios de tensão** são alterações súbitas de duração muito curta (ns,  $\mu$ s ou ms), mas com tempo de subida muito rápido e magnitude alta. Transitórios impulsivos (surtos de tensão), são comumente causados por descargas atmosféricas, enquanto os transitórios oscilatórios são causados por chaveamento de cargas.

As **variações de tensão** podem ser uma interrupção, um afundamento ou uma elevação de tensão. Elas são comumente separadas em variações de tensão de curta duração (VTCD) ou de longa duração. As variações de tensão de curta duração podem ser caracterizadas por alterações instantâneas (0,5 a 30 ciclos), momentâneas (30 ciclos a 3 s) ou temporárias (3 s a 1 min), enquanto as variações de longa duração se mantêm por mais de 1 min.

As **interrupções de tensão** são eventos de tensão zero ou menor que 10% do valor nominal. Podem ser causadas por curto-circuito, operações de disjuntores ou, até mesmo, manutenção da linha. As interrupções costumam ser eventos de curta duração, com duração inferior a 30 s. Em linhas de distribuição, as interrupções de curta duração costumam ser causadas por galhos de árvores que se agitam ao vento, enquanto as de longa duração podem ser devido à queda de um poste, por exemplo.

Os **afundamentos de tensão**, também chamados de *Voltage Sags* ou *Voltage Dips*, são reduções momentâneas do valor da tensão, em uma ou mais fases do sistema elétrico, para valores de tensão entre 10% e 90% da tensão nominal. Podem ser causados por partida de grandes cargas, energização de transformadores, conexão do sistema após uma determinada interrupção ou por curto-circuito (faltas) na rede elétrica.

O afundamento de tensão é um dos distúrbios mais significantes quando se trata de qualidade de energia, uma vez que é o distúrbio mais comum nos sistemas elétricos. A frequência com que um afundamento ocorre (número de vezes que o distúrbio ocorre em um determinado período de tempo) é um ponto relevante para determinar seus impactos no sistema.

As **elevações de tensão**, também conhecidas como *Voltage Swell*, são aumentos entre 10% e 80% da tensão nominal. Assim como os afundamentos, as elevações são normalmente associadas a faltas no sistema, mas não são tão comuns. A magnitude e duração da elevação depende da natureza da falta (permanente ou temporária) e da sua localização na rede elétrica.

Já as **flutuações de tensão** são uma série de variações de tensão sistemáticas e intermitentes dentro de uma faixa entre 95% e 105% da tensão nominal. Tais flutuações são geralmente causadas por cargas industriais (por exemplo fornos a arco, laminadores e máquinas de solda). Como principal efeito da flutuação de tensão, pode-se destacar o fenômeno da cintilação de luz (*flicker*), que é observado pelo olho humano e causa desconforto visual.

Os **desequilíbrios de tensão** são definidos como o desvio máximo da média das correntes ou tensões trifásicas, dividido pela média das correntes ou tensões trifásicas, expresso em percentual. Suas principais causas são as cargas trifásicas desequilibradas, má distribuição das cargas monofásicas ou ainda, qualquer desequilíbrio na rede elétrica, como transformadores, linhas de transmissão e bancos de capacitores desbalanceados.

Existem diversos distúrbios que podem causar distorções na forma de onda, podemos destacar a presença de harmônicos, inter-harmônicos, tensão ou corrente contínua, ruídos e cortes de tensão, também conhecidos como *notching*.

PAULILO [18] organizou as categorias mais comuns dos distúrbios de qualidade de energia, suas causas e algumas soluções práticas, conforme apresentado na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Categorias de classificação dos distúrbios [18].

DISTÚRBIOS	CAUSA	EFEITO	SOLUÇÃO
<b>Transitórios impulsivos</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Descargas atmosféricas;</li> <li>• Chaveamentos de cargas e/ou dispositivos de proteção</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Excitação de circuitos ressonantes;</li> <li>• Redução da vida útil de motores, geradores, transformadores, etc.;</li> <li>• Erros de processamento e perdas de sinais.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Filtros;</li> <li>• Supressores de surtos;</li> <li>• Transformadores isoladores;</li> </ul>
<b>Transitórios oscilatórios</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Descargas atmosféricas;</li> <li>• Chaveamentos de capacitores, linhas, cargas e transformadores;</li> <li>• Transitórios impulsivos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mau funcionamento de equipamentos controlados eletronicamente, conversores de potência, etc.;</li> <li>• Redução da vida útil de motores, geradores, etc.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Filtros;</li> <li>• Supressores de surtos;</li> <li>• Transformadores isoladores;</li> </ul>
<b>Sub e sobretensões</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Partidas de motores;</li> <li>• Variações de cargas;</li> <li>• Chaveamento de capacitores;</li> <li>• TAPs de transformadores ajustados incorretamente.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pequena redução na velocidade dos motores de indução e no reativo dos bancos de capacitores;</li> <li>• Falhas em equipamentos eletrônicos;</li> <li>• Redução da vida útil de máquinas rotativas, transformadores, cabos, disjuntores, TPs e TCs;</li> <li>• Operação indevida de relés de proteção, motores, geradores, etc.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reguladores de tensão;</li> <li>• Fontes de energia de reserva;</li> <li>• Chaves estáticas;</li> <li>• Geradores de energia.</li> </ul>
<b>Interrupções</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Curto-circuito;</li> <li>• Operação de disjuntores;</li> <li>• Manutenção.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Falha de equipamentos eletrônicos e de iluminação;</li> <li>• Desligamento de equipamentos;</li> <li>• Interrupção do processo produtivo.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fontes de energia sobressalentes;</li> <li>• Sistemas “no-break”;</li> <li>• Geradores de energia.</li> </ul>
<b>Desequilíbrios</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fornos a arco;</li> <li>• Cargas monofásicas e bifásicas;</li> <li>• Assimetrias entre as impedâncias;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Redução da vida útil de motores de indução e máquinas síncronas;</li> <li>• Geração, pelos retificadores, de 3º harmônico e seus múltiplos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Operação simétrica;</li> <li>• Dispositivos de compensação.</li> </ul>
<b>Nível CC</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Operação ideal de retificadores de meia onda, etc.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Saturação de transformadores;</li> <li>• Corrosão eletrolítica de eletrodos de aterramento e de outros conectores.</li> </ul>	
<b>Harmônicos</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cargas não lineares.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sobreaquecimento de cabos, transformadores e motores de indução;</li> <li>• Danificação de capacitores, etc.;</li> <li>• Operação indevida de disjuntores, relés, fusíveis, etc.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Filtros;</li> <li>• Transformadores isoladores;</li> <li>• Reatores de linhas.</li> </ul>
<b>Inter-harmônicos</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Conversores estáticos de potência e Cicloconversores;</li> <li>• Motores de indução;</li> <li>• Equipamentos a arco, etc.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Interferência na transmissão de sinais Carrier;</li> <li>• Indução de <i>flicker</i> visual no display de equipamentos.</li> </ul>	
<b>Notching</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Equipamentos eletrônicos de potência.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Operação indevida de dispositivos de medição e proteção.</li> </ul>	
<b>Ruídos</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Chaveamento de equipamentos eletrônicos de potência;</li> <li>• Radiações eletromagnéticas.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Distúrbios em equipamentos eletrônicos (computadores e controladores programáveis).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aterramento das instalações;</li> <li>• Filtros.</li> </ul>
<b>Flutuações de tensão</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cargas intermitentes;</li> <li>• Fornos a arco;</li> <li>• Partidas de motores.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Flicker</i>;</li> <li>• Oscilação de potência e torque nas máquinas elétricas;</li> <li>• Queda de rendimento de equipamentos elétricos;</li> <li>• Interferência nos sistemas de proteção.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sistemas estáticos de compensação de reativos;</li> <li>• Capacitores em série.</li> </ul>

Os distúrbios elétricos da Tabela 2.1 podem ser agrupados de acordo com seu tempo de duração e sua amplitude. De acordo com a sua duração, os distúrbios podem ser classificados em:

- **Transitórios:** são fenômenos de curtíssima duração (ns,  $\mu$ s ou ms), podendo ser do tipo impulsivo ou oscilatório;
- **Temporários:** são fenômenos que envolvem a variação da tensão da rede durante algum período de tempo. Dependendo deste período são denominadas variações de curta duração (compreendendo as instantâneas, momentâneas e temporárias) ou variações de longa duração;
- **Regime permanente:** correspondem aos fenômenos de regime permanente e que ficam superpostos à frequência fundamental da rede, compreendendo os desequilíbrios de tensão, as distorções na onda e as flutuações de tensão, este último de caráter intermitente.

A Tabela 2.2, resume os distúrbios agrupados de acordo com sua duração e apresenta ainda suas principais características de acordo com a norma IEE 1159 [19].

Tabela 2.2 – Características dos principais distúrbios da qualidade de energia [19].

CATEGORIAS	DURAÇÕES	CONTEÚDO ESPECTRAL	MAGNITUDES
<b>Transitórios</b>			
<b>Impulsivos</b>			
ns	< 50 ns	Frente de 5 ns	
$\mu$ s	50 ns – 1 ms	Frente de 1 $\mu$ s	
ms	> 1 ms	Frente de 0,1 ms	
<b>Oscilatórios</b>			
Baixa frequência	0,3 – 50 ms	< 5 kHz	0 – 4 pu*
Média frequência	20 $\mu$ s	5 – 500 kHz	0 – 8 pu
Alta frequência	5 $\mu$	0,5 – 5 MHz	0 – 4 pu
<b>Variações de tensão de curta duração</b>			
<b>Instantânea</b>			
Afundamento	0,5 – 30 ciclos		0,1 – 0,9 pu
Elevação	0,5 – 30 ciclos		1,1 – 1,8 pu
<b>Momentânea</b>			
Interrupção	0,5 ciclo – 3 s		< 0,1 pu
Afundamento	30 ciclos – 3 s		0,1 – 0,9 pu
Elevação	30 ciclos – 3 s		1,1 – 1,4 pu
<b>Temporária</b>			
Interrupção	3 s – 1 min		< 0,1 pu
Afundamento	3 s – 1 min		0,1 – 0,9 pu
Elevação	3 s – 1 min		1,1 – 1,2 pu
<b>Variações de tensão de longa duração</b>			
Interrupção sustentada	> 1 min		0,0 pu
Afundamento sustentado	> 1 min		0,8 – 0,9 pu
Elevação sustentada	> 1 min		1,1 – 1,2 pu
<b>Distorção da forma de onda</b>			
Nível CC	Regime permanente		0 – 0,1%
Harmônicos	Regime permanente	0 – 9 kHz	0 – 20%
Inter-harmônicos	Regime permanente	0 – 9 kHz	0 – 2%
Notching	Regime permanente		
Ruído	Regime permanente		0 – 1%
<b>Flutuação de tensão</b>	Intermitente	< 25 kHz	0,1 – 7%

\*A quantidade pu refere-se a sistema por unidade, que é adimensional. A quantidade 1,0 pu corresponde a 100%.

## 2.2 Redes de Bragg

A rede de Bragg em fibra óptica consiste em uma modulação periódica do índice de refração do núcleo de fibra. Essas modulações são chamadas de grades (ou redes) e são, em sua forma mais simples, perpendiculares ao eixo de propagação da luz.

Quando um sinal luminoso de banda larga é introduzido na fibra, ao atingir a rede, alguns dos comprimentos de onda serão refletidos pela variação periódica do índice de refração, devido à interação com diferentes índices de refração em seu núcleo (Efeito Fresnel). Se o comprimento de onda não satisfizer a condição de reflexão de Bragg, a luz refletida estará fora de fase e tenderá a se cancelar.

Quando a condição de Bragg é satisfeita, a luz refletida sofrerá interferência construtiva e formará um pico de reflexão. O comprimento de onda da luz refletida é chamado comprimento de onda de Bragg e é dado por:

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

na qual,  $n_{\text{eff}}$  é o índice de refração efetivo do núcleo da fibra,  $\Lambda$  é o período de modulação do índice de refração e  $\lambda_B$  representa o comprimento de onda de Bragg do espectro refletido quando um sinal luminoso incide na FBG, como descrito por HILL *et al.* [20].

A Figura 2.2 apresenta um diagrama representativo da interação entre uma rede de Bragg com a luz propagante na fibra óptica. Em resumo, a rede atua com um filtro espectral, capaz de refletir apenas um determinado comprimento de onda.

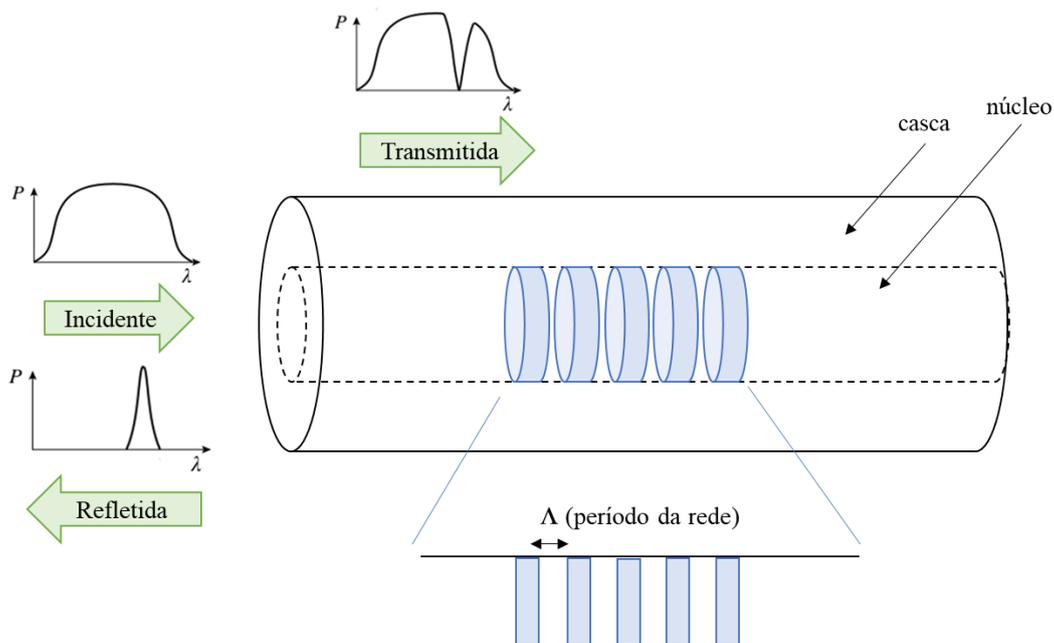


Figura 2.2 – Interação de uma rede de Bragg com uma luz incidente.

Conforme a Equação 2.1, o comprimento de onda central refletido pela FBG (comprimento de onda de Bragg) depende do índice de refração efetivo do núcleo e da periodicidade das modulações. Este índice e o espaçamento entre as modulações podem ser afetados por alterações no ambiente.

Uma deformação longitudinal, devido a uma força externa, pode alterar tanto  $n_{\text{eff}}$  quanto  $\Lambda$ , através do efeito fotoelástico. Além disso, uma variação de temperatura também é capaz de alterar os dois parâmetros, devido ao efeito termo-óptico e à expansão térmica da sílica.

Dessa forma, a FBG é essencialmente um sensor de temperatura e deformação. No entanto, diversos parâmetros podem ser medidos se corretamente relacionados com os parâmetros que afetam diretamente o comprimento de onda de Bragg.

A equação de Bragg estabelece a relação entre o comprimento de onda de Bragg, a deformação e a temperatura aplicada a uma FBG [21]:

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

na qual:

$\Delta\lambda_B$  é o deslocamento espectral do comprimento de onda de Bragg,

$\lambda_B$  é a representação espectral do comprimento de onda de Bragg,

$\varepsilon_{\text{FBG}}$  é deformação longitudinal da rede ( $\Delta L_{\text{FBG}}/L_{\text{FBG}}$ ),

$\Delta T$  é a variação de temperatura,

$\rho_e$  é o coeficiente foto-elástico,

$\eta$  é o coeficiente termo-óptico e

$\alpha_{\text{FBG}}$  é o coeficiente de expansão térmica da sílica.

Para fibras de sílica com núcleo dopado com germânio, com comprimento de onda de Bragg centrado em  $\lambda_B = 1550$  nm, temos os seguintes valores para os coeficientes citados:  $\rho_e = 0,22$ ,  $\eta = 8,6 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$  e  $\alpha_{\text{FBG}} = 0,55 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ .

### 2.2.1 Sensibilidade da FBG em relação à deformação e temperatura

O primeiro termo da Equação 2.2 representa o deslocamento do comprimento de onda de Bragg devido a uma deformação, enquanto o segundo termo representa o deslocamento em função da temperatura. Considerando a temperatura constante, a equação de Bragg se resume a:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - \rho_e)\varepsilon_{\text{FBG}} \quad (2.3)$$

Para uma fibra óptica de sílica com comprimento de onda centrado em 1550 nm, substituindo seu valor e o valor do coeficiente foto-elástico na Equação 2.3, obtemos a sensibilidade da FBG em relação a deformação:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\varepsilon_{\text{FBG}}} = 1,21 \text{ pm}/\mu\varepsilon \quad (2.4)$$

na qual: 1  $\mu\varepsilon$  (micro *strain*) é uma unidade de deformação relativa igual a 1  $\mu\text{m}/\text{m}$ .

O segundo termo da Equação 2.2 representa o deslocamento do comprimento de onda de Bragg devido a uma variação de temperatura. Considerando uma deformação igual a zero ( $\varepsilon_{\text{FBG}} = 0$ ), a equação de Bragg pode ser escrita como:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (\eta + \alpha_{\text{FBG}})\Delta T \quad (2.5)$$

Mais uma vez, para uma fibra centrada em 1550 nm, substituindo na Equação 2.6 o valor do comprimento de onda de Bragg, do coeficiente termo-óptico e do coeficiente de expansão térmica da sílica, temos a sensibilidade teórica da FBG em relação a temperatura:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\Delta T} = 14,18 \text{ pm}/^\circ\text{C} \quad (2.6)$$

### 2.2.2 Interrogação de Redes de Bragg

Técnicas de interrogação ou demodulação são utilizadas para medir variações no comprimento de onda de Bragg refletido de uma FBG, quando submetida a um dado mensurando.

Diferentes métodos podem ser empregados e a escolha depende de vários fatores. VALENTE *et al* [22] citam como exemplo: as bandas de frequências envolvidas, sua distribuição espacial, a faixa dinâmica de deformações ou temperatura a serem medidas e o número de sensores interrogados. Além disso, deve-se levar em consideração as limitações de espaço e peso do sistema de medição e o custo do método escolhido.

A técnica mais simples para a determinação do comprimento de onda central de redes de Bragg é a utilização direta de um interrogador óptico comercial. No entanto, seu custo é elevado e aumenta conforme a necessidade de medidas mais precisas e dinâmicas. Uma segunda opção é o uso de analisador de espectro óptico (OSA – *Optical*

*Spectrum Analyzer*) em conjunto com uma fonte de banda larga e um circulator óptico, conforme mostra a Figura 2.3.

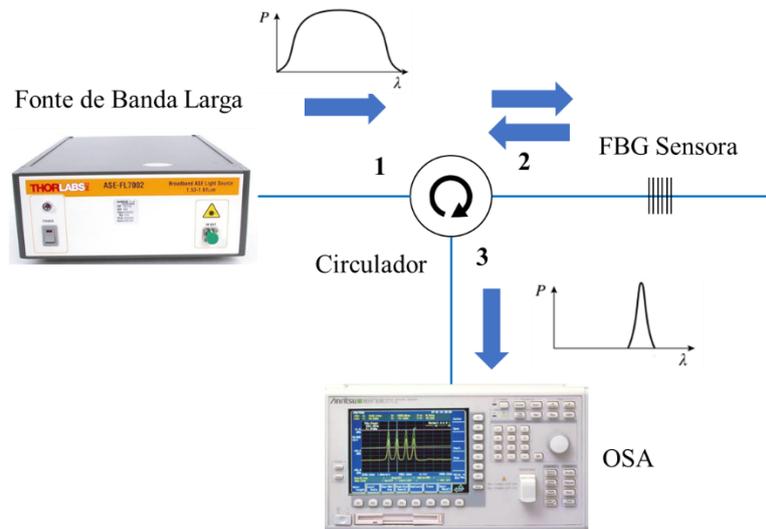


Figura 2.3 – Interrogação de uma FGB utilizando um OSA.

O sinal da fonte de banda larga incide na FBG sensora através da porta 1 do circulator, já o sinal refletido no comprimento de onda de Bragg retorna pela porta 2 e é enviado ao analisador de espectro óptico através da porta 3.

A mostra o espectro óptico de uma FBG centrada em 1531,840 nm e medida através do OSA modelo AQ6370C do fabricante Yokogawa.

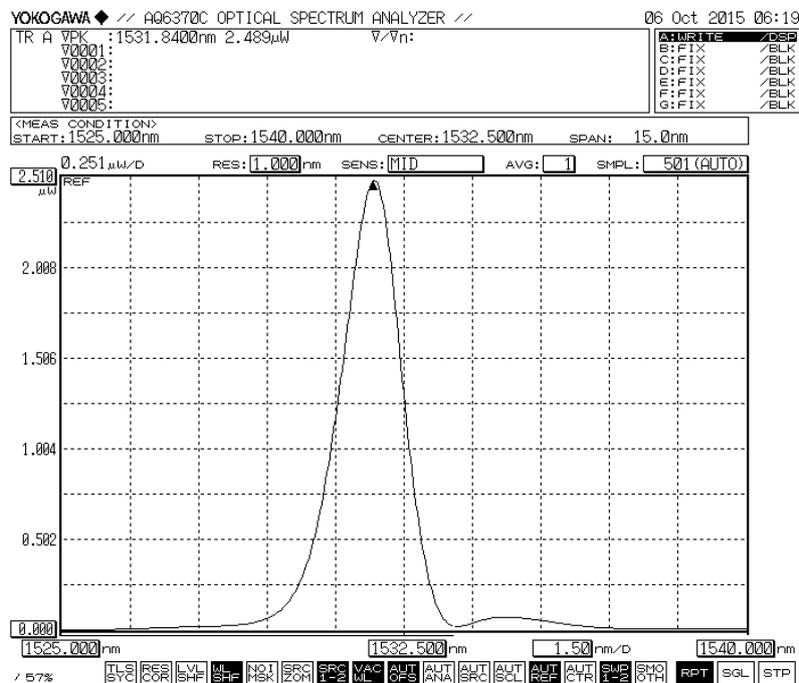


Figura 2.4 – Espectro óptico refletido por uma FBG visualizado no OSA.

A principal vantagem no uso de uma OSA é a simplicidade e rapidez na montagem do sistema de medidas. No entanto, seu peso e volume limita sua aplicação nos sistemas de

medição fora de laboratório, além do seu custo elevado. Outra desvantagem é a lentidão com que a varredura do espectro óptico é realizada, tipicamente uma varredura por minuto numa faixa de 100 nm, o que limita sua utilização a medidas estáticas.

Uma alternativa ao uso do OSA e dos interrogadores comerciais, que permite medidas dinâmicas, é o uso de um *set-up* utilizando filtros sintonizáveis. Os trabalhos propostos segundo essa ideia utilizam filtros acusto-ópticos, filtros Fabry-Perot (FFP) ou FBGs sintonizáveis.

A ideia central da demodulação por filtros sintonizáveis consiste em rastrear o sinal refletido pela FBG sensora por uma varredura do espectro do filtro dentro da faixa de operação do sensor. O sinal de saída é a convolução do espectro de reflexão da FBG sensora com o espectro de um filtro sintonizável.

A Figura 2.5 mostra o esquema de demodulação, utilizando um filtro Fabry-Perot.

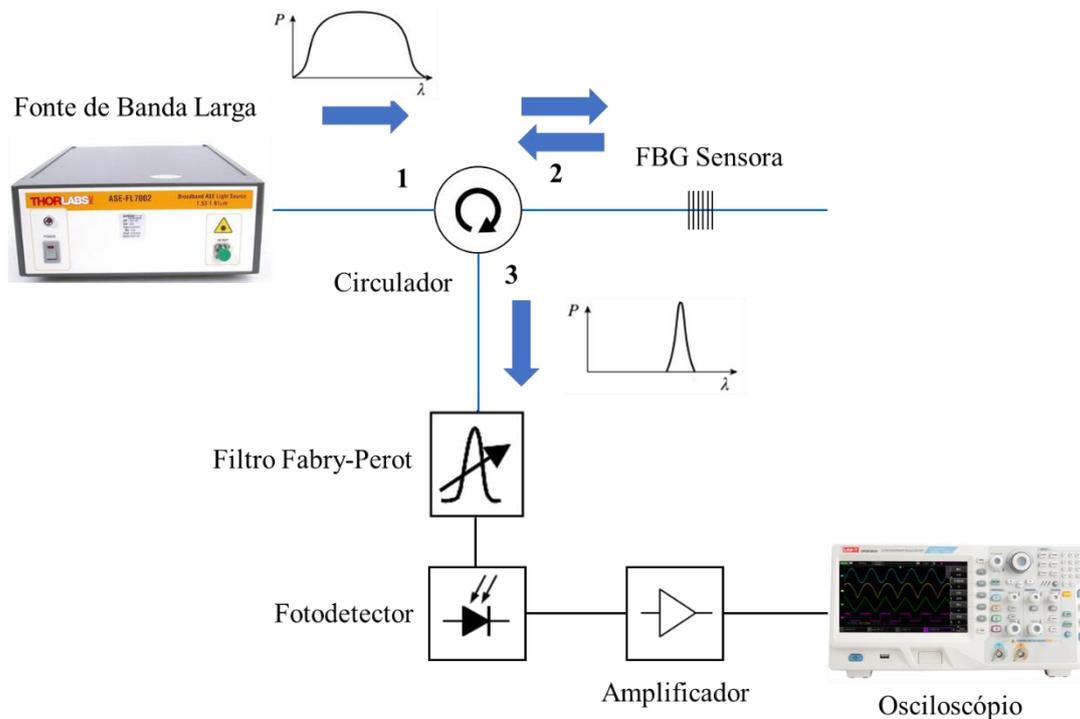


Figura 2.5 – Demodulação de uma FBG utilizando filtro Fabry-Perot.

Assim como na demodulação utilizando o OSA, no esquema da Figura 2.5 o sinal luminoso emitido pela fonte de banda larga é enviado para a FBG sensora através da porta 1 do circulador. O sinal refletido pela FBG no comprimento de onda de Bragg retorna pela porta 2 e é enviado em direção ao filtro Fabry-Perot pela porta 3.

A interseção entre os espectros do filtro e da FBG produz um sinal com uma potência óptica que varia de acordo com as variações de  $\lambda_B$ . A intensidade luminosa pode ser capturada por um fotodetector e, posteriormente, amplificada e direcionada para um

osciloscópio. A intensidade de luz detectada através do fotodetector é máxima quando o pico de transmissão do filtro coincide com o pico de reflexão da FBG sensora.

## 2.3 Cerâmicas Piezoelétricas

### 2.3.1 Fundamentos da piezoeletrecidade

Existem materiais que, sob pressão ou tensão mecânica, geram cargas elétricas em sua superfície. Este efeito foi descoberto em 1880 por Pierre e Jacques Curie e foi denominado efeito piezoelétrico. No ano seguinte, Gabriel Lippmann demonstrou que esse efeito é reversível, ou seja, a aplicação de um campo elétrico causa a deformação do material.

O efeito piezoelétrico pode ser definido como a conversão de uma energia mecânica em elétrica, denominado efeito piezoelétrico direto, ou a conversão de uma energia elétrica em mecânica, denominado efeito piezoelétrico reverso

Alguns cristais, como o quartzo, turmalina e topázio possuem propriedades piezoelétricas naturalmente. No entanto, cerâmicas também podem ser polarizadas e passam a apresentar o efeito piezoelétrico. Estas cerâmicas piezoelétricas podem ser feitas de titanato de chumbo ( $\text{PbTiO}_2$ ), zirconato de chumbo ( $\text{PbZrO}_3$ ) ou titanato de bário ( $\text{BaTiO}_3$ ). Já as cerâmicas feitas de chumbo, zirconato e titanato ( $\text{PbZrTi}$ ) ganham a abreviação de PZT devido às iniciais de seus materiais.

As cerâmicas do tipo PZT são utilizadas em diversas aplicações, pois são consideradas superiores em relações às demais. RIBEIRO [23] destaca que elas possuem uma elevada eficiência na conversão eletromecânica, boa estabilidade das propriedades nas variações de temperatura, baixa perda dielétrica e um processo de despolarização menos severo.

As cerâmicas PZT são cerâmicas possuem estrutura cristalina tipo Perovskita. Segundo a ATCP do Brasil [24], para que um sólido cristalino apresente polarização espontânea, ele não pode ser centrossimétrico, isto é, o centro de cargas negativas não pode coincidir com o centro de cargas positivas.

Na Figura 2.6 (a) está representado um material centrossimétrico, enquanto na Figura 2.6 (b) temos outro não centrossimétrico. Pode-se observar que o material não centrossimétrico apresenta o íon positivo deslocado do centro de cargas negativas.

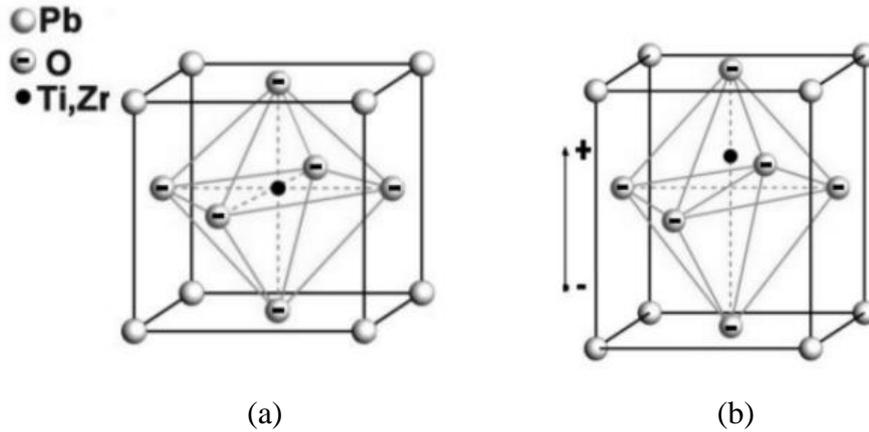


Figura 2.6 – Estrutura Perovskita (a) Material centrossimétrico (b) Material não centrossimétrico [24].

Quando a cerâmica PZT está abaixo de uma determinada temperatura crítica, conhecida como temperatura de Curie, o íon é deslocado do centro de cargas e apresenta uma simetria tetragonal (não centrossimétrico). Já quando a cerâmica está acima da temperatura de Curie o íon está no centro da carga (centrossimétrico) e a cerâmica possui simetria cúbica.

A existência do dipolo faz com que a estrutura cristalina se deforme na presença de um campo elétrico e gere um deslocamento elétrico quando submetida a uma deformação mecânica, o que caracteriza o efeito piezoelétrico inverso e direto respectivamente.

### 2.3.2 Propriedades das cerâmicas piezoelétricas

Devido à natureza anisotrópica da cerâmica PZT, os efeitos piezoelétricos dependem da direção. Para identificar as direções, são utilizados os eixos 1, 2 e 3, correspondendo aos eixos x, y e z do sistema clássico de coordenadas, conforme mostra a Figura 2.7.

O eixo 3 é sempre paralelo à direção de polarização. O eixo de polarização é induzido durante o processo de fabricação pela aplicação de um elevado campo CC.

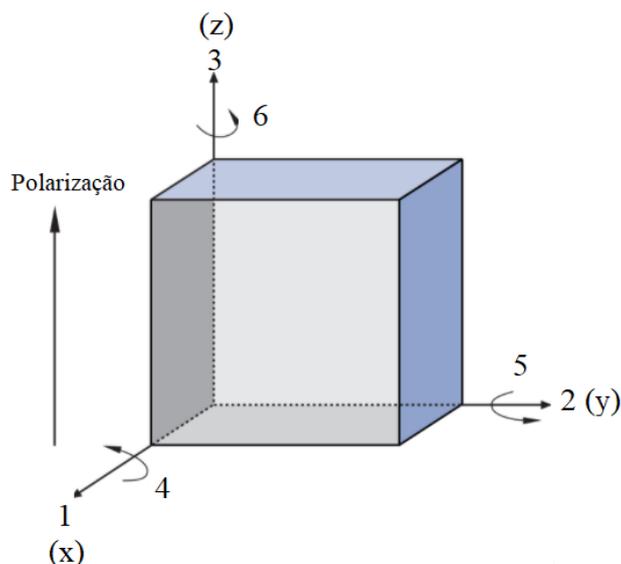


Figura 2.7 – Direção das forças que afetam uma cerâmica piezoelétrica, adaptado de PI CERAMICS [25].

### Constante de carga piezoelétrica ( $d_{ij}$ )

A constante de carga piezoelétrica informa qual é a proporção entre a variação dimensional do material piezoelétrico (em m/m) e o campo elétrico aplicado (em V/m). O índice  $i$  representa a direção do campo elétrico aplicado e o índice  $j$  a direção em que está sendo medida a deformação.

A constante  $d_{33}$  descreve a deformação paralela ao vetor de polarização da cerâmica (espessura), quando a força é aplicada no mesmo sentido do eixo de polarização. Já  $d_{31}$  descreve a deformação ortogonal ao vetor de polarização (largura), quando a força é aplicada perpendicular ao eixo de polarização, conforme mostra a Figura 2.8 (a) e Figura 2.8 (b), respectivamente.

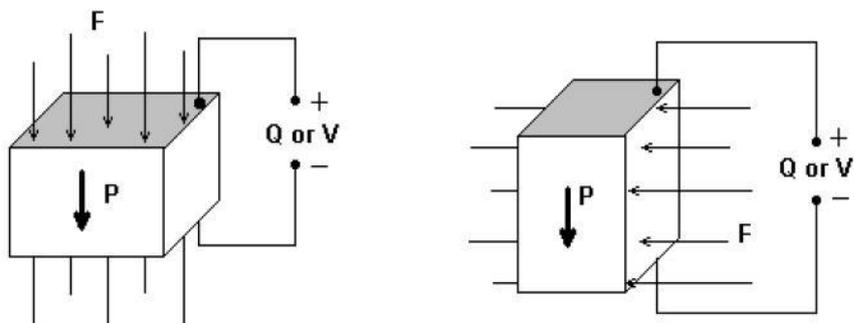


Figura 2.8 – Deslocamento (a) paralelo a  $P$  e (b) ortogonal a  $P$  de um material PZT, onde  $P$  é o vetor de indica a direção de polarização da cerâmica e  $F$  indica a força aplicada [26].

Para uma cerâmica com formato em anel, com eletrodos depositados em suas faces, como a da Figura 2.9, a constante  $d_{31}$  representa uma deformação da largura da cerâmica, enquanto  $d_{33}$  representa uma deformação em sua espessura. O deslocamento da espessura da cerâmica é dado por [25]:

$$\Delta\omega = E d_{33} \omega_0 \quad (2.7)$$

na qual  $E$  é o campo elétrico e pode ser reescrito como  $V_{in}/\omega_0$ .  $V_{in}$  é tensão aplicada entre os eletrodos do PZT, em volts, e  $\omega_0$  a espessura inicial do anel. Assim, a variação da espessura do anel pode ser resumida a:

$$\Delta\omega = V_{in} d_{33} \quad (2.8)$$

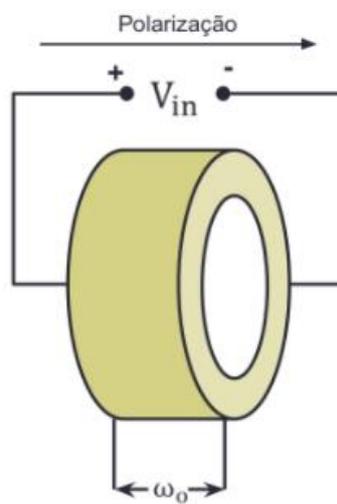


Figura 2.9 – Cerâmica PZT em formato anel.

### Constante de tensão piezoelétrica ( $g_{ij}$ )

Informa qual é a proporção entre o campo gerado (em  $V/m$ ) e a força aplicada (em  $N/m^2$ ) para uma cerâmica com comprimento de 1 metro. O índice  $i$  representa a direção do campo elétrico gerado e o índice  $j$  a direção da força aplicada.

### Temperatura de Curie ( $T_c$ )

É a temperatura crítica na qual a estrutura cristalina do material piezoelétrico perde sua polarização instantânea e o material muda para o estado não piezoelétrico. Para cada tipo de cerâmica existe um ponto de Curie onde as constantes piezoelétricas são máximas.

### **Coefficiente de acoplamento ( $k_{ij}$ )**

É uma constante que representa a eficiência de um material piezoelétrico. Mais especificamente, representa a conversão de energia elétrica (aplicada através dos eletrodos de uma cerâmica piezoelétrica) em energia mecânica. É um coeficiente adimensional, já que descreve a relação entre energias.

### **Frequência de ressonância e antirressonância**

O circuito equivalente de Maison, representado na Figura 2.10 pode ser utilizado para caracterizar o comportamento de uma cerâmica piezoelétrica.

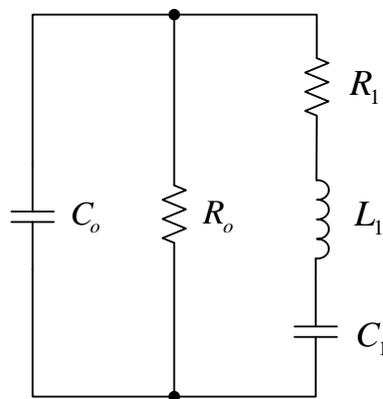


Figura 2.10 – Circuito equivalente de uma cerâmica PZT.

O equivalente elétrico é composto por um circuito RLC série, que representa as ressonâncias mecânicas do ressonador piezoelétrico em paralelo com uma capacitância  $C_o$  e o resistor  $R_o$ , que representam o capacitor formado pelo material e seus eletrodos.

Quando uma tensão alternada é aplicada aos eletrodos do material piezoelétrico, este começará a oscilar com a frequência característica. Se a frequência da fonte for elevada a ordem de 100 kHz, o circuito pode atingir uma frequência na qual o ramo RLC ressona, chamada de frequência de ressonância.

Ao aumentar ainda mais a frequência da fonte, até cerca de 200 kHz, pode-se atingir uma frequência na qual o indutor  $L_1$  e o capacitor  $C_1$  ressonam com o capacitor  $C_o$ , caracterizando o ponto de máxima impedância do circuito. Esta frequência é chamada de frequência de antirressonância.

### Fator de dissipação elétrica ( $\tan \delta$ )

No circuito equivalente elétrico da cerâmica é a relação entre reatância capacitiva e resistência do capacitor paralelo. Seu valor é uma medida das perdas dielétricas do material.

### Fator de qualidade mecânico ( $Q_m$ )

É o que define a qualidade da cerâmica como um oscilador harmônico, pois é uma medida das perdas mecânicas (amortecimento) do material. No circuito equivalente elétrico representa a ressonância de vibração mecânica.

A Figura 2.11 mostra as propriedades das cerâmicas PZT do fabricante Sparkler Ceramics. A cerâmica do tipo SP-4 foi a utilizada nesse trabalho. Essa cerâmica possui um constante de carga piezoelétrica de valor mediano e um baixo fator de dissipação elétrica.

DATA	Lead Zirconate Titanate				
	SP-4	SP-8	SP-5A	SP-5J	SP-5H
Piezoelectric Coupling Co-efficient:					
$k_p$	0.60	0.50	0.61	0.60	0.63
$k_{33}$	0.68	0.63	0.70	0.71	0.73
Piezoelectric Charge Constants					
$d_{33}$ ( $\times 10^{-12}$ C/N)	300	215	400	460	550
$d_{31}$ ( $\times 10^{-12}$ C/N)	-11.5	- 9.5	- 170	- 210	- 265
Piezoelectric Voltage Constants					
$g_{33}$ ( $\times 10^{-3}$ Vm/N)	26	25	25	22	19
$g_{31}$ ( $\times 10^{-3}$ Vm/N)	- 11	- 11	- 11	- 9	- 9
Relative Dielectric Constant, $K^T_3$ (low signal)	1250	1000	1750	2450	3100
Dissipation factor, $\tan \delta$ (low field)	0.004	0.004	0.020	0.020	0.020
Density, $\rho$ ( $\text{kg/m}^3$ )	7600	7600	7650	7500	7500
Curie temperature, $T_c$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	325	330	360	260	190
Mechanical Quality Factor, $Q_m$	500	1000	75	70	65

Figura 2.11 – Propriedades das cerâmicas PZT do fabricante *Sparkler Ceramics* [27].

## 2.4 Princípio de funcionamento de um sensor de tensão FBG-PZT

Uma das formas de medir a deformação de uma cerâmica piezoelétrica é utilizando uma rede de Bragg colada sobre o material, conforme esquema apresentado na Figura 2.12, uma vez que a rede é sensível a deformação.

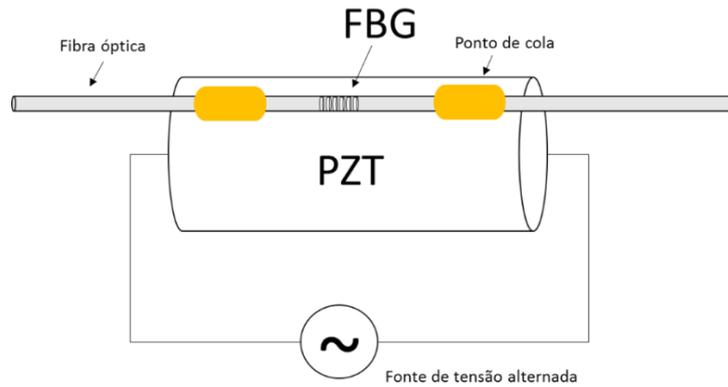


Figura 2.12 – Princípio de funcionamento de um sensor de tensão FBG-PZT.

Ao aplicar tensões CA no material piezoelétrico ele irá variar a sua espessura inicial, comprimindo e expandindo, respeitando a Equação 2.8. A rede de Bragg colada sobre o PZT irá acompanhar o deslocamento da sua espessura provocando uma variação proporcional no comprimento de onda de Bragg. Para que isso aconteça é necessário esticar previamente a FBG, a fim de evitar sua envergadura no momento de compressão.

O diagrama da Figura 2.12 apresenta a forma mais simples de relacionar a variação de  $\lambda_B$  com o deslocamento do PZT. Ao utilizar cerâmicas em formato de anel, a FBG também pode ser fixada no interior da cavidade da cerâmica. Para aumentar a sensibilidade do conjunto, cerâmicas empilhadas são frequentemente empregadas. Nessa configuração, para que a FBG acompanhe o deslocamento de toda a pilha, melhores formas de fixação devem ser avaliadas.

Em todas as configurações mencionadas, o princípio de funcionamento desse tipo de sensor, baseia-se na premissa de que o deslocamento da FBG será proporcional ao deslocamento das cerâmicas PZTs, que por sua vez é proporcional tensão aplicada entre seus eletrodos, e dessa forma é possível obter uma relação do tipo  $\Delta\lambda_B/\Delta V_{in}$ . No Capítulo 5 é desenvolvida essa relação teórica e a sensibilidade do sensor em relação a tensão de entrada é apresentada.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 Redes de Bragg e cerâmicas piezoelétricas para medidas de tensão

Sensores de tensão que combinam o uso de redes de Bragg e cerâmicas piezoelétricas tem sido fonte de estudo ao longo dos últimos anos. Esses sensores, também chamados de transformadores de potencial ópticos, apresentam diversas vantagens em relação aos transformadores convencionais.

Os TPOs não possuem núcleo ferromagnético e têm seu princípio de funcionamento baseado no efeito do campo elétrico. Eles são capazes de fornecer um sinal fidedigno para os sistemas de proteção e controle, além de fornecerem medidas mais precisas para os aparelhos de medição.

Apesar de sua grande vantagem em relação aos TPs convencionais, algumas questões em torno dos TPOs baseados em FBG-PZT têm sido exploradas para melhorar sua aplicabilidade em campo. São elas:

- Aumento da sensibilidade do sensor: busca-se obter uma melhor relação entre a tensão elétrica aplicada no PZT e a deformação sofrida pela rede de Bragg. A sensibilidade pode ser melhorada através da escolha do correto arranjo de fixação da FBG no material piezoelétrico.
- Máxima tensão a ser aplicada no sensor: pode ser um limitante para aplicações em média e alta tensão, uma vez que as cerâmicas perdem suas propriedades piezoelétricas quando submetidas a um campo elétrico na faixa de 300 a 2000 V/mm, dependendo do método de fabricação.
- Compensação térmica: questão de grande importância para não comprometer as medidas do sensor, uma vez que a rede de Bragg é sensível à deformação e temperatura, mas deseja-se medir apenas a deformação do conjunto devido a aplicação da tensão.

ALLIL *et al.* [6] propuseram um sistema de medição de alta tensão usando um PZT como um transdutor de tensão e uma FBG como elemento sensor para medição de deformação. O sensor foi submetido a tensões CC de até 5 kV e as variações no comprimento de onda de Bragg foram monitoradas.

No primeiro experimento, a sensibilidade experimental ficou longe do esperado. Para aumentar a sensibilidade, foi projetado um amplificador mecânico. Como resultado,

obteve-se uma boa precisão, no entanto, o sensor foi testado apenas com tensões de corrente contínua e a influência da temperatura não foi avaliada experimentalmente.

RIBEIRO *et al.* [7] propuseram um sensor FBG-PZT para medições de tensão composto por uma pilha de PZTs, a fim de aumentar a sensibilidade do sensor. Inicialmente, tensões CC foram aplicadas para caracterizar o sensor e tensões CA de até 2 kV foram utilizadas no experimento final. Os resultados apresentaram uma distorção harmônica, principalmente em torno da máxima tensão aplicada.

A sensibilidade experimental do transformador de potencial projetado foi menor que a esperada, o que pode ser justificado pela falta de análise da influência da temperatura nas medidas de tensão e pelo arranjo mecânico escolhido que bloqueia parte do deslocamento da pilha de PZTs.

GONÇALVES [8] contornou o problema da máxima tensão a ser aplicada no sensor construindo um divisor capacitivo de potencial composto por uma coluna capacitiva acoplada ao sensor. Dessa forma, o TPO foi capaz de medir tensões de distribuição da classe 13,8 kV. Essa tensão foi aplicada ao divisor capacitivo de potencial e, aproximadamente, 4 kV foram aplicados diretamente ao elemento sensor.

Já DANTE [9] conseguiu aplicar 10 kV no sensor utilizando um divisor capacitivo construído com as próprias cerâmicas piezoelétricas conectadas eletricamente em série. Essa construção permite o escalonamento do sensor para níveis mais altos de tensão, incluindo mais anéis PZTs no divisor.

FUSIEK *et al.* [10] focaram na avaliação de seu sensor de tensão, também baseado em cerâmicas PZT e redes de Bragg, de acordo com as normas que regulam os transformadores de potencial ópticos. Um PZT de grande espessura foi utilizado com o objetivo de aumentar a tensão máxima a ser aplicado ao sensor.

Os resultados apresentados para erro de relação e deslocamento de fase demonstraram que o sensor tem potencial para cumprir os padrões das normas IEC. Apesar disso, uma análise da sensibilidade do sensor e a influência da temperatura nas medidas não foram apresentadas.

### **3.2 Compensação de temperatura em sensores FBG**

Em aplicações nas quais se utiliza um sensor baseado em rede de Bragg a fim de medir apenas sua deformação, os impactos da variação de temperatura acabam por afetar o

processo de medição, seja devido à variação da temperatura ambiente ou provocada pelo próprio mensurando.

Sensores baseados em FBG e cerâmicas PZT para aplicações nos sistemas elétricos sofrem com os dois tipos de variações. Os ambientes adversos encontrados “em campo” são consideravelmente diferentes do ambiente de laboratório e a temperatura pode mudar devido às condições ambientais. Além disso, as cerâmicas piezoelétricas que compõem os TPOs tendem a aquecer quando submetidas a tensões alternadas, devido ao seu fator de dissipação elétrica ( $\tan \delta$ ) e fator de qualidade mecânica ( $Q_m$ ).

O primeiro é uma medida das perdas dielétricas do material, enquanto o segundo é uma medida das perdas mecânicas do material. Esses dois fatores determinam a energia dissipada como calor pela cerâmica piezoelétrica quando um campo elétrico CA é aplicado.

Diversas técnicas de compensação de temperatura para sensores baseados em FBG têm sido empregadas. Segundo XIONG *et al.* [28], um método comumente adotado é a adição de uma FBG de referência deixada livre para medir a temperatura ambiente. Essa rede de Bragg deve ser posicionada próxima a FBG utilizada para medir o parâmetro de interesse. Subtraindo-se o deslocamento do comprimento de onda da FBG de referência do comprimento de onda da FBG principal, é possível obter uma resposta livre da influência das variações de temperatura.

No entanto, uma segunda FBG precisa ser usada e para isso é suposto que o deslocamento do comprimento de onda das duas FBGs são os mesmos (ou proporcionais uns aos outros) e estão sincronizados com a variação de temperatura. Assim, o resultado diferencial deve ser próximo de zero. No entanto, na prática, devido a fatores incontrolláveis relacionados ao processo de fabricação das FBGs que afetam suas características de encapsulamento, a validade dessa suposição é incerta.

GARÇÃO *et al.* [29] desenvolveram um transformador de corrente óptico baseado em FBG termicamente compensado empregando um par de FBGs no sistema de medição. Ambas as FBGs são coladas no mesmo tipo de substrato, mas apenas uma delas é submetida a variações de campo magnético, enquanto ambas sofrem variações de temperatura, conforme esquema da Figura 3.1.

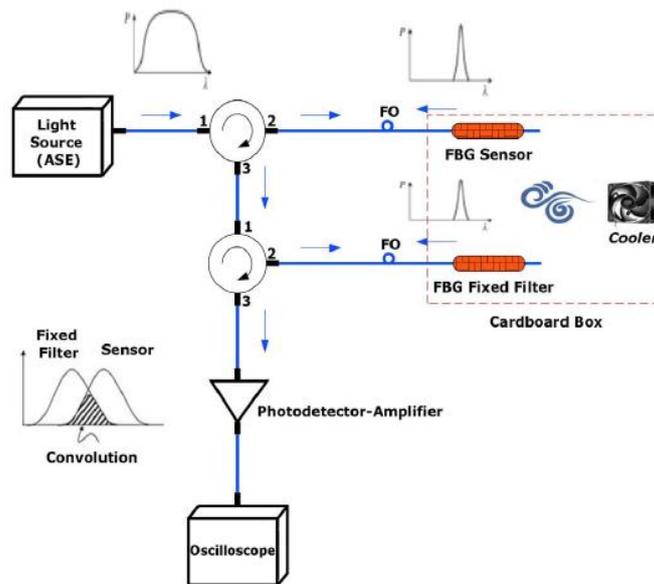


Figura 3.1 – Compensação de temperatura de um TCO empregando duas FBGs [29].

A vantagem desse sistema é o uso da segunda FBG, submetida apenas a temperatura, também como filtro fixo, habilitando o uso da técnica de demodulação por redes gêmeas e reduzindo o custo da implementação.

Para os transformadores de potencial ópticos baseados em FBG e cerâmicas PZT, DANTE *et al.* [30] também utilizam uma técnica de interrogação baseada em redes gêmeas e compensa a temperatura através do uso de um atuador piezoelétrico que desloca o pico espectral da FBG sintonizável para rastrear a FBG sensora sob as variações de temperatura.

FLORIDIA *et al.* [31] utilizaram duas FBGs conectadas em paralelo e em série. Em cada configuração, uma delas foi submetida apenas a variações de temperatura, enquanto a segunda foi sujeita a variações de campo elétrico e temperatura. As FBGs foram fixadas em duas peças PZT do mesmo tipo, garantindo que elas serão sensíveis à temperatura na mesma forma.

YANG *et al.* [11] seguiram a mesma proposta e apresentaram um conjunto composto por duas estruturas piezoelétricas e duas FBGs. Uma das estruturas foi utilizada como referência e a outra como elemento sensor (Figura 3.2). A tensão não foi aplicada na estrutura de referência, apenas na estrutura sensora, enquanto ambas estavam sujeitas a variações de temperatura.

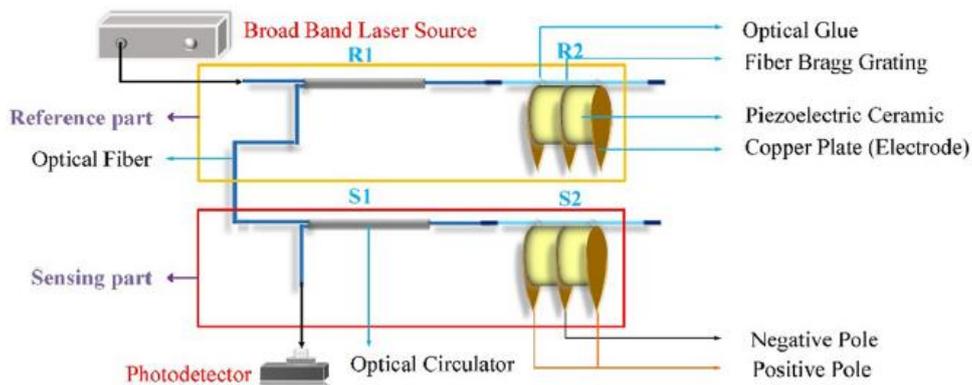


Figura 3.2 – Compensação de temperatura de um TPO empregando duas FBGs [11].

Apesar da eficiência da metodologia, as duas FBGs devem ser feitas do mesmo material, com exatamente o mesmo coeficiente de expansão térmica e coeficiente térmico-ótico. O sensor foi testado com tensões CA até 2,5 kV e sua eficácia para compensar temperatura foi verificada. Embora os resultados tenham sido satisfatórios, o custo de produzir uma estrutura piezoelétrica de referência igual a estrutura sensora não foi avaliado.

Alguns autores vêm estudando um método não convencional para compensar as variações de temperatura com apenas uma FBG usando uma técnica passiva [32], [33], [34]. Este método é conhecido como *biomaterial effect* e é baseado no uso de materiais apropriados com diferentes coeficientes de expansão térmica (CTE) na estrutura do sensor.

Na proposta de HSU *et al.* [34], um sensor de pressão baseado em FBG é construído fixando a rede em materiais com diferentes coeficientes de dilatação (alumínio e cobre). Quando a temperatura aumenta, a dilatação dos materiais provoca uma deformação negativa na FBG, que gera uma variação negativa no comprimento de onda de Bragg. Esse afrouxamento da rede contrabalança o crescimento do comprimento de onda devido a temperatura.

Para os transformadores ópticos baseados em FBG, RIBEIRO [23] utiliza o mesmo princípio e o aplica ao transformador, combinando em sua construção materiais com diferentes coeficientes de dilatação térmica e variando seus comprimentos. Nessa proposta, a FBG é colada entre dois parafusos feitos de materiais diferentes. Durante uma variação de temperatura, a expansão dos parafusos comprime a rede de forma que ela permaneça imóvel mesmo que seu comprimento de onda tenda a aumentar.

Já FUSIEK *et al.* [35] propuseram o uso de uma FBG com um pico duplo e duas vezes o comprimento do elemento piezoelétrico utilizado na construção do sensor. Neste

arranjo, metade do FBG é colada ao material piezoelectrico e a outra metade é ligada a um eletrodo estendido feito de um material com um coeficiente de expansão térmica similar ao coeficiente da cerâmica piezoelectrica.

### 3.3 Medidas de qualidade de energia com TPOs

ROSOLEM *et al.* [36] fizeram uma ampla revisão da aplicação de sensores ópticos para monitoração de qualidade de energia em média tensão, discutindo aspectos tecnológicos, econômicos, normativos e práticos de instalação. Foram analisados os transformadores ópticos baseados nos efeitos Pockels, Faraday, em redes de Bragg e alimentação óptica por fibra (PoF – Power over Fiber).

Segundo ROSOLEM *et al.* [36], para que os sensores ópticos possam ser aplicados para monitorar a qualidade da energia elétrica, é necessário que eles possuam alta precisão e alta largura de banda. Além disso, o monitoramento da qualidade da rede é realizado temporariamente e por isso o equipamento deve ser fácil de instalar e remover da rede de distribuição elétrica. A dependência da temperatura também deve ser considerada, uma vez que tais sensores serão adicionados ao campo, sujeito a diversas variações de temperatura ambiente.

Embora diversos autores tenham estudado o uso de materiais piezoelectricos e redes de Bragg para medidas de tensão, em geral, os ensaios são feitos para tensões CA sem nenhum tipo de distúrbio e com uma frequência fixa (50 ou 60 Hz). A resposta do TPO aos possíveis defeitos de tensão que comprometem a qualidade do sinal da rede é fundamental para que eles possam ser aplicados em medidas de qualidade de energia.

RIBEIRO *et al.* [7] testaram seu sensor em tensões CA de até 2 kV a 60 Hz. A tensão de alimentação foi gerada por uma fonte de tensão alternada. GONÇALVES [8] utilizou o sinal da própria rede conectado a um Variac e, em seguida, a um transformador elevador, enquanto FUSIEK *et al.* [10] utilizaram uma fonte CA conectada a um transformador elevador para gerar os sinais aplicados ao sensor.

DANTE [9] submeteu seu sensor a um transiente de tensão, aplicando um sinal senoidal de 60 Hz modulado por uma onda quadrada de 1 Hz. Foi utilizado um gerador de sinais, conectado a um pré-amplificador acoplado a um transformador elevador. Um transiente abrupto foi aplicado no sensor (1,77 kV<sub>rms</sub> → 2,66 kV<sub>rms</sub>) e observou-se que o sensor óptico acompanha a variação de tensão, apresentando apenas um deslocamento de fase devido ao *setup* experimental.

YANG *et al.* [11] testaram seu conjunto com sinais de entrada senoidal, quadrado e triangular em frequências iguais a 50 Hz, 3 kHz e 8 kHz. Para gerar os sinais de entrada foi utilizado um gerador de sinais conectado a um amplificador. A máxima tensão aplicada foi de 2,5 kV. Foi observada uma forte consistência entre a tensão de entrada de diferentes formas de onda e as respostas do sensor com frequências diferentes. Distorções foram observadas principalmente para entrada triangular e quadrada. Já para a entrada senoidal, o sinal de saída ficou distorcido quando a frequência aplicada é próxima das frequências de ressonância e antirressonância do material PZT.

NASIR *et al.* [37] avaliaram a possibilidade de utilizar um sensor híbrido para medidas de tensão e corrente na detecção de faltas no sistema elétrico. A resposta do sensor a uma ocorrência de falta foi simulada considerando seu modelo teórico, porém repostas de tensão e corrente sob faltas não foram aplicados ao sensor.

Apesar dos TPO baseados em FBG-PZT ainda não serem normatizados, uma série de normas buscam analisar os problemas associados a qualidade de energia e são relevantes para estudo do tema, são elas:

- IEC 61869-103: trata do uso de transformadores de instrumentação para medidas de qualidade de energia;
- IEC 61000-4:30: define os métodos para medição dos parâmetros de qualidade de energia em CA e interpretação dos resultados.
- IEEE 1159: recomenda as boas práticas para o monitoramento da qualidade da energia elétrica
- ANEEL – PRODIST – Módulo 8: estabelece os procedimentos relativos à qualidade da energia elétrica, abordando a qualidade do produto e a qualidade do serviço.

## 4 COMPENSAÇÃO PASSIVA DE TEMPERATURA

Neste capítulo será apresentado o princípio de funcionamento do sistema de compensação passiva de temperatura empregado neste trabalho. Esse princípio baseia-se no modelo desenvolvido por GONÇALVES [8] e RIBEIRO [23], no qual é utilizada uma combinação de diferentes materiais com diferentes coeficientes de expansão térmica na estrutura do sensor.

Em seguida, o arranjo mecânico do transformador de potencial óptico é apresentado. Os componentes do arranjo são parte fundamental do modelo de compensação de temperatura. Por fim, são demonstrados os cálculos teóricos para o dimensionamento dos materiais responsáveis pela compensação térmica e os ajustes necessários na montagem do arranjo para incluir estes materiais.

### 4.1 Princípio do sistema de compensação passiva

Segundo a Equação 2.2 tanto uma deformação aplicada a fibra ( $\epsilon_{\text{FBG}}$ ) quanto uma variação de temperatura ( $\Delta T$ ) são capazes de provocar variações no comprimento de onda de Bragg ( $\Delta \lambda_B$ ).

Como o transformador projetado baseia-se no princípio de deformação volumétrica das cerâmicas piezoelétricas devido a aplicação de um campo elétrico sobre elas, desejamos que a FBG reproduza esse deslocamento e seja possível mensurá-lo através das variações do comprimento de onda de Bragg.

Para que essa medida não seja comprometida, as variações do comprimento de onda de Bragg devido a temperatura devem ser compensadas. Uma forma de realizar essa compensação é determinar qual deve ser a deformação sofrida pela FBG para se obter  $\Delta \lambda_B = 0$  para todas as temperaturas. Podemos encontrar esse valor fazendo a equação de Bragg (Equação 2.2) igual a zero:

$$\frac{\Delta L_{\text{FBG}}}{L_{\text{FBG}}} = - \frac{(\eta + \alpha_{\text{FBG}}) \Delta T}{(1 - \rho_e)} \quad (4.1)$$

A Tabela 4.1 mostra os parâmetros da FBG utilizada nesse trabalho. Esta rede de Bragg foi fabricada no Laboratório de Instrumentação e Fotônica (LIF) da COPPE/UFRJ e seus parâmetros foram obtidos através de ensaios de calibração. É possível observar que os coeficientes obtidos estão próximos aos valores teóricos apresentados no Capítulo 2.2.

Tabela 4.1 – Parâmetros da FBG utilizada no transformador.

Parâmetro	Valor
Comprimento de onda central da FBG	$\lambda_B = 1536,270 \text{ nm}$
Coefficiente de dilatação térmica da sílica	$\alpha_{\text{FBG}} = 0,55 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$
Coefficiente termo-óptico	$\eta = 6,541 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$
Coefficiente fotoelástico	$\rho_e = 0,252$
Comprimento da FBG	$L_{\text{FBG}} = 15 \text{ mm}$

Substituindo os valores do coeficiente termo-óptico, coeficiente de dilatação térmica da sílica e coeficiente fotoelástico da Tabela 4.1 na Equação 4.1, encontramos qual deve ser a deformação da rede de Bragg para se obter  $\Delta\lambda_B = 0$ :

$$\frac{\Delta L_{\text{FBG}}}{L_{\text{FBG}}} = -9,48 \times 10^{-6} \Delta T \quad (4.2)$$

Por fim, substituindo na Equação 4.2 o valor do comprimento da FBG, podemos determinar qual deve ser o deslocamento da rede em função da temperatura.

$$\Delta L_{\text{FBG}} = -0,142 \times 10^{-6} \Delta T \quad (4.3)$$

Em resumo, a FBG deve comprimir  $-0,142 \times 10^{-6} \text{ m}/^{\circ}\text{C}$  a fim de que o comprimento de onda de Bragg permaneça estático.

Uma forma de comprimir a FBG durante uma variação de temperatura é fixando suas extremidades em materiais com diferentes coeficientes de dilatação, de forma que eles consigam comprimir a rede quando expandirem termicamente.

Como o transformador óptico utilizado nesse trabalho é composto por diversos materiais, não apenas aqueles em que a FBG é fixada, todos os componentes da estrutura devem fazer parte do sistema de compensação. Em seguida, será explorado como o arranjo mecânico do transformador foi construído e como foi realizada a escolha dos materiais para compensar as variações da rede devido à temperatura.

## 4.2 Arranjo mecânico do transformador

A Figura 4.1 mostra uma fotografia do arranjo mecânico do transformador com detalhamento de todos os seus componentes, incluindo a FBG. O conjunto segue o projeto mecânico desenvolvido por GONÇALVES [8] mas possui melhorias fundamentais para que o sistema de compensação funcione.

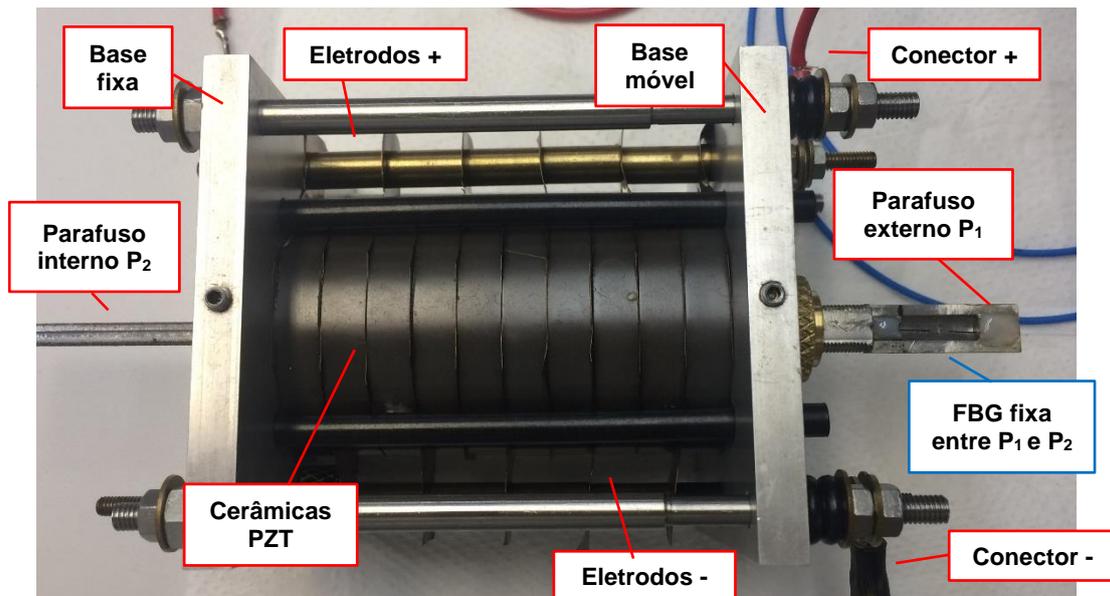


Figura 4.1 – Vista superior da estrutura do TPO.

As cerâmicas utilizadas são do tipo SP-4 do fabricante Sparkler Ceramics. Trata-se de uma cerâmica com constante de carga piezoelétrica ( $d_{33}$ ) igual a 300 pm/V, baixo fator de dissipação elétrica e fator de qualidade mecânica, o que reduz suas perdas dielétricas e mecânicas.

A estrutura mecânica do transformador foi construída com uma pilha de 10 anéis PZTs conectados eletricamente em paralelo. Desta forma, um alto campo elétrico é aplicado em cada cerâmica, ao invés de dividir a tensão aplicada pelo número de anéis, caso fossem conectados em série. Apesar da tensão ser eletricamente aplicada em paralelo, todos os anéis são dispostos mecanicamente em série, fazendo com que o deslocamento total seja multiplicado pelo número de anéis, aumentando assim a sensibilidade do sensor.

Para garantir a conexão elétrica entre as cerâmicas, chapas de cobre com 0,2 mm de espessura foram usadas como eletrodos. Os eletrodos foram conectados em paralelo através de duas hastes de latão, que se estendem até os conectores, onde é aplicada tensão de entrada.

Duas placas de sustentação feitas de alumínio foram utilizadas em cada lado da pilha de PZTs, uma placa base fixa e outra móvel. O-rings foram usados como arruelas no lado móvel para permitir a expansão e contração das cerâmicas durante a aplicação da tensão alternada.

A fim de facilitar o manuseio da FBG e seu procedimento de colagem, ao invés de fixar a FBG diretamente na cavidade interna da pilha de cerâmicas, a rede de Bragg

foi colada entre as extremidades de dois parafusos, cada um preso a uma extremidade da pilha de cerâmicas.

O parafuso P<sub>2</sub> (interno) passa pela cavidade interna da pilha de PZTs e se encaixa no interior do parafuso P<sub>1</sub> (externo). Desta forma, ambas as extremidades dos parafusos estão disponíveis fora da pilha e a FBG foi colada entre eles, no vão entre o parafuso interno e o externo.

Pela análise da Figura 4.1 podemos ver que o comprimento de todo o conjunto externo formado pela pilha de cerâmicas, os eletrodos entre elas, as placas base fixa e móvel e o parafuso externo, deve ser o mesmo que o comprimento do parafuso interno somado ao comprimento da FBG colada entre sua extremidade e o parafuso externo.

$$L_{\text{FBG}} + L_{\text{P2}} = 10 \times L_{\text{PZT}} + 11 \times L_{\text{elet}} + 2 \times L_{\text{PB}} + L_{\text{P1}} \quad (4.4)$$

na qual L<sub>FBG</sub>, L<sub>P2</sub>, L<sub>PZT</sub>, L<sub>elet</sub>, L<sub>PB</sub>, e L<sub>P1</sub> são o comprimento da FBG, do parafuso 2, das cerâmicas PZT, dos eletrodos entre as cerâmicas, das placas base (fixa e móvel) e do parafuso 1, respectivamente.

Para facilitar a visualização da configuração citada, a Figura 4.2 mostra todos os comprimentos envolvidos no sistema.

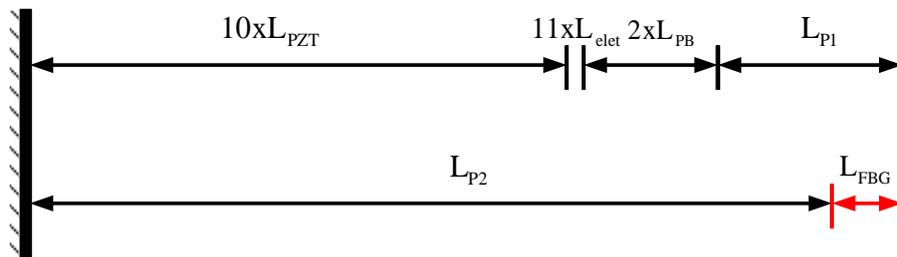


Figura 4.2 – Comprimentos dos elementos do TPO

### 4.3 Dimensionamento dos materiais para compensação

A fim de compensar as flutuações de temperatura, todos os materiais utilizados na estrutura do TPO foram cuidadosamente projetados para que a dilatação de todas as partes, incluindo a FBG, seja completa e exatamente compensada pela dilatação dos dois parafusos que prendem a rede. Nesta configuração, os parafusos são dispostos coaxialmente de tal forma que um desliza dentro do outro.

Considerando a placa de sustentação do lado esquerdo como fixa, podemos concluir que todo o conjunto se dilata para direita, no sentido da placa móvel, levando os parafusos e, conseqüentemente, a FBG colada entre as suas extremidades.

A Tabela 4.2 mostra todos os elementos utilizados na construção mecânica do transformador, com seus respectivos coeficientes de dilatação térmica, comprimento e quantidades. O comprimento dos parafusos 1 e 2 e seus respectivos materiais foram deixados como incógnitas para que seja possível escolher os materiais que compensem as variações no sistema.

Tabela 4.2 – Parâmetros dos materiais utilizados na construção do TPO.

Descrição	Material	CTE ( $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ )	Comprimento (mm)	Quant.
FBG	Sílica	0,55	15	1
Cerâmicas	PZT-4	3,6	8	10
Eletrodos	Cobre	17,0	0,2	11
Placas base fixa e móvel	Alumínio	24,0	10	2
Parafuso 1 (externo)	A ser definido	$\alpha_{P1}$	$L_{P1}$	1
Parafuso 2 (interno)	A ser definido	$\alpha_{P2}$	$L_{P2}$	1

Substituindo os valores da Tabela 4.2 na Equação 4.4, é possível obter uma relação entre os parafusos 1 e 2 para que o conjunto externo tenha a mesma dimensão do conjunto interno:

$$L_{P2} = 0,0872 + L_{P1} \quad (4.5)$$

Além disso, observando a Figura 4.2 é fácil notar que a variação no comprimento da rede é dada pela diferença entre o deslocamento de todo o conjunto, no qual está fixado uma das pontas da fibra, e o deslocamento do parafuso 2, no qual está fixado a outra ponta, conforme mostra a Equação 4.6.

$$\Delta L_{\text{FBG}} = 10 \times \Delta L_{\text{PZT}} + 11 \times \Delta L_{\text{elet}} + 2 \times \Delta L_{\text{PB}} + \Delta L_{P1} - \Delta L_{P2} \quad (4.6)$$

na qual  $\Delta L_{\text{FBG}}$ ,  $\Delta L_{\text{PZT}}$ ,  $\Delta L_{\text{elet}}$ ,  $\Delta L_{\text{PB}}$ ,  $\Delta L_{P1}$  e  $\Delta L_{P2}$  são as variações do comprimento da FBG, das cerâmicas PZT, dos eletrodos entre as cerâmicas, das placas base (fixa e móvel), do parafuso 1 e do parafuso 2, respectivamente.

A variação do comprimento de um material devido a sua expansão térmica pode ser calculada a partir do conhecimento do seu coeficiente de dilatação [39]:

$$\Delta L = L_0 \alpha \Delta T \quad (4.7)$$

na qual  $\Delta L$  representa a variação do comprimento do material,  $L_0$  seu comprimento inicial,  $\alpha$  seu coeficiente de dilatação linear e  $\Delta T$  a variação da temperatura a qual o material foi submetido.

Aplicando a Equação 4.7 para os materiais da Tabela 4.2, obtemos a variação de comprimento dos elementos que compõem o transformador. Por sua vez, a variação da rede de Bragg deve ser negativa e igual ao valor apresentado na Equação 4.3, a fim de garantir que o comprimento de onda de Bragg seja igual a zero durante a expansão do conjunto em função da temperatura.

A Tabela 4.3 resume o deslocamento de todos os componentes do transformador. Substituindo seus valores na Equação 4.6, obtemos uma equação com quatro parâmetros desconhecidos, são eles: o comprimento dos parafusos 1 e 2 ( $L_{P1}$  e  $L_{P2}$ ) e seus respectivos coeficientes de dilatação ( $\alpha_{P1}$  e  $\alpha_{P2}$ ).

Tabela 4.3 – Deslocamento dos materiais que compõe o TPO.

<b>Material</b>	<b>Deslocamento devido à expansão térmica</b>
FBG	$\Delta L_{\text{FBG}} = - L_{\text{FBG}} 9,48 \cdot 10^{-6} \Delta T = -0,142 \times 10^{-6} \Delta T$
Cerâmicas	$10\Delta L_{\text{PZT}} = 10 L_{\text{PZT}} \alpha_{\text{PZT}} \Delta T = 0,288 \times 10^{-6} \Delta T$
Eletrodos	$11\Delta L_{\text{elet}} = 11 L_{\text{elet}} \alpha_{\text{elet}} \Delta T = 0,0374 \times 10^{-6} \Delta T$
Placas base fixa e móvel	$2\Delta L_{\text{PB}} = 2 L_{\text{PB}} \alpha_{\text{PB}} \Delta T = 0,480 \times 10^{-6} \Delta T$
Parafuso 1 (externo)	$\Delta L_{P1} = L_{P1} \alpha_{P1} \Delta T$
Parafuso 2 (interno)	$\Delta L_{P2} = L_{P2} \alpha_{P2} \Delta T$

Podemos eliminar uma das incógnitas, utilizando a Equação 4.5 que relaciona os comprimentos dos dois parafusos, sendo necessário escolher apenas quais materiais que irão compor os parafusos para se obter qual deve ser o comprimento dos mesmos.

A Tabela 4.4 mostra os diferentes materiais considerados por GONÇALVES [8] para resolver esse problema. O zinco e o chumbo apresentam um coeficiente de dilatação muito alto, bom para compensar a expansão da estrutura externa, porém estes materiais foram descartados por serem muito plásticos e de difícil usinagem.

Tabela 4.4 – Coeficiente de dilatação térmica de alguns materiais.

<b>Material</b>	<b>Coeficiente de dilatação térmica (<math>\alpha</math>)</b>
Zinco	$35,0 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$
Chumbo	$29,0 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$
Alumínio	$24,0 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$
Aço inox 304	$18,2 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$
Latão ou Bronze	$18,0 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$
Aço inox 316	$17,5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$
Cobre	$17,0 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$
Aço 1020	$12,0 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$
Invar	$1,2 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$

A solução final proposta por GONÇALVES [8] foi: parafuso 1 (externo) feito de alumínio com comprimento igual a 7,64 cm e parafuso 2 (interno) feito de cobre com comprimento igual a 16,36 cm. No entanto, no ensaio de validação, o comprimento de onda de Bragg não se manteve estático quando submetido a variações de temperatura. Ele cresceu de forma linear com uma taxa de  $44,5 \text{ pm}/^{\circ}\text{C}$ .

A partir do crescimento do comprimento de onda de Bragg encontrado, foi calculado qual foi a real variação do comprimento da rede, substituindo seu valor na Equação 4.1. Esse valor foi igual a  $0,438 \times 10^{-6} \text{ m}/^{\circ}\text{C}$  quando deveria ser negativo e igual a  $-0,142 \times 10^{-6} \text{ m}/^{\circ}\text{C}$ , conforme apresentado na Equação 4.3.

A discrepância entre o valor teórico e o experimental pode ser devido ao valor do coeficiente de dilatação do PZT-4. O coeficiente apresentado na Tabela 4.2 foi medido experimentalmente por GONÇALVES [8] e utilizado nos cálculos teóricos, uma vez que esse valor não foi fornecido pelo fabricante *Sparkler Ceramics* e pode variar a cada ciclo de aquecimento da cerâmicas.

Todos os demais CTEs são conhecidos na literatura e uma pequena variação em relação aos seus valores teóricos, o que ocorre na prática uma vez que os materiais não são puros e sim compostos por ligas metálicas, não causaria um crescimento tão acentuado no comprimento da FBG.

Já um coeficiente de dilatação da cerâmica maior do que o valor utilizado nos cálculos apresentados poderia justificar o fato da estrutura externa crescer mais do que o parafuso 2, acarretando numa variação positiva do comprimento da FBG colada entre os parafusos do conjunto.

A partir da real variação do comprimento da rede obtida experimentalmente, GONÇALVES [8] calculou o coeficiente de dilatação das cerâmicas que estaria ocasionando um crescimento do conjunto maior do que o esperado. O valor obtido foi igual a  $10,85 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ . Esse valor se aproxima do valor obtido por RIBEIRO [23] em seu sistema de compensação de temperatura com cerâmicas do tipo SP-4.

Com esse resultado, as Equações (4.5 e (4.6 foram novamente resolvidas, deixando como incógnita apenas o comprimento dos parafusos ( $L_{P1}$  e  $L_{P2}$ ) e aplicando o coeficiente de dilatação dos materiais projetados inicialmente.

Os parafusos de alumínio e cobre foram confeccionados com comprimentos maiores que o dimensionado para que houvesse a possibilidade de ajuste manual de seus tamanhos a partir do rosqueamento deles. No entanto, não existe solução para as Equações (4.5 e (4.6 mantendo o parafuso 1 de alumínio, pois ocasionou um comprimento negativo.

Novos materiais foram testados para encontrar uma configuração que compense o sistema termicamente. A Tabela 4.5 apresenta uma nova solução viável de materiais e comprimentos para os parafusos 1 e 2.

Tabela 4.5 – Nova configuração para os parafusos 1 e 2.

Descrição	Material	Coefficiente de dilatação térmica ( $\alpha$ )	Comprimento
Parafuso 1	Invar	$1,2 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$	4,38 cm
Parafuso 2	Aço 1020	$12,0 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$	13,10 cm

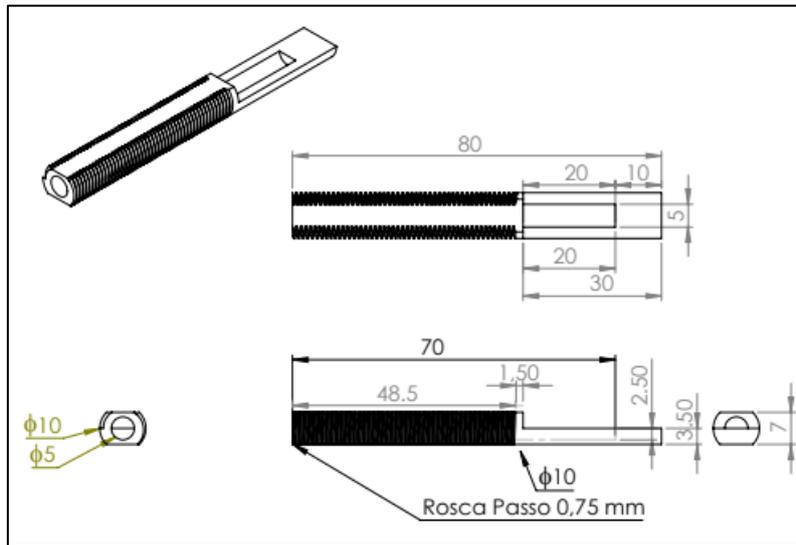
Nota-se que, nessa nova configuração, o parafuso 1 deve crescer minimamente, uma vez que todo o conjunto de cerâmicas tem uma expansão elevada. Já o parafuso 2, que passa por toda a cavidade interna do conjunto, deve ser capaz de compensar todas as demais expansões térmicas e, portanto, seu coeficiente de dilatação deve ser mais elevado que o do parafuso 1 e demais materiais envolvidos.

O invar é uma liga à base de níquel e ferro e sua principal propriedade é possuir um baixo coeficiente de dilatação térmica. Apesar de sua difícil usinagem, foi possível confeccionar o parafuso 1 de invar com rosca de passo 0,8 mm a fim de facilitar o ajuste de seu comprimento na estrutura mecânica.

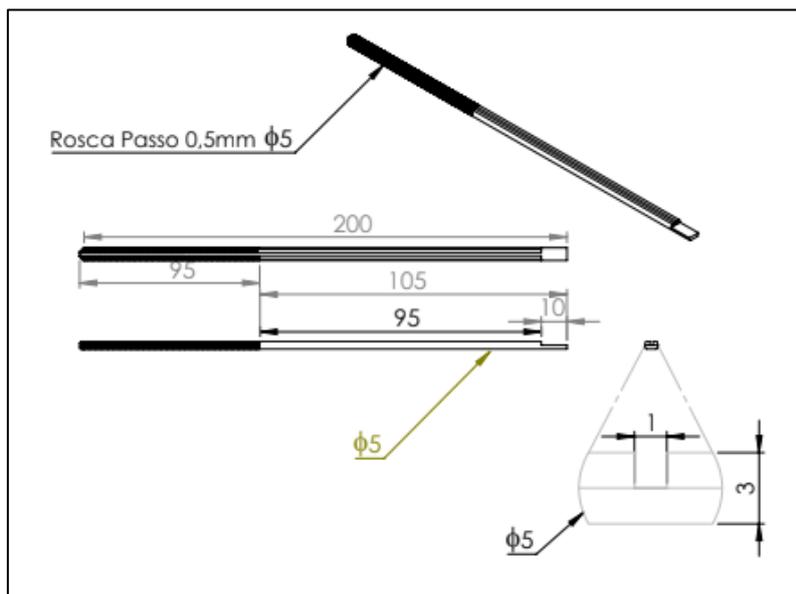
Já o aço 1020 é um aço carbono de fácil aquisição no mercado utilizado em diversas aplicações comerciais. Ele é composto basicamente por ferro, carbono, silício e manganês. Seu coeficiente de dilatação não é elevado, mas suficiente para compensar o

conjunto, uma vez que o resultado de seu comprimento é elevado. Como sua usinagem é mais simples, foi possível confeccioná-lo com uma rosca de passo 0,5mm.

A Figura 4.3 mostra o projeto dos parafusos.



(a)



(b)

Figura 4.3 – Especificações técnicas do parafusos (a) Parafuso 1 e (b) Parafuso 2.

#### 4.4 Ajuste dos componentes do transformador

Antes de realizar os ensaios, é necessário realizar o procedimento de fixação da FBG entre os parafusos que compõe a estrutura do transformador. Em seguida, deve ser feito o correto posicionamento dos parafusos no arranjo mecânico para que compensem termicamente o sistema.

O comprimento total do parafuso 1 (parafuso externo feito de invar) é de 8 cm, enquanto o comprimento do parafuso 2 (parafuso interno feito de aço 1020) é de 20 cm. Ambos os parafusos foram usinados com um corpo maior do que o tamanho dimensionado, para que seja possível ajustar manualmente o seu comprimento ideal através das roscas que os prendem.

Para realizar o procedimento de fixação da FBG nos parafusos, foi utilizado uma resina fotopolimerizável. A distância entre os pontos de cola, isto é, o tamanho do vão entre os parafusos, foi fixada em 15 mm (Figura 4.4). Esse tamanho representa o comprimento da rede de Bragg ( $L_{FBG}$ ) utilizado nos cálculos apresentados até aqui.

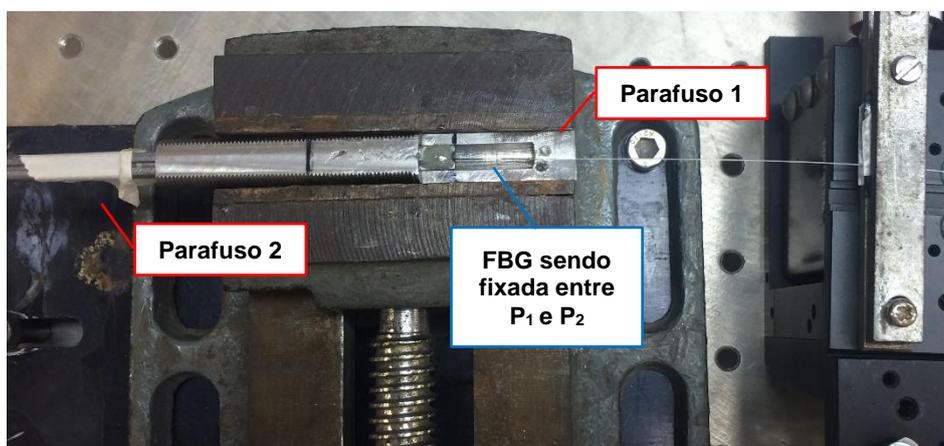


Figura 4.4 – Procedimento de fixação da FBG.

A resina fotopolimerizável é composta de uma pasta base e catalizador. Antes de aplicá-la, foi necessário remover o revestimento primário (acrilato) da fibra óptica para garantir maior aderência da resina. Em seguida, foi realizado o condicionamento da superfície de colagem, limpando-a corretamente, lixando e preparando-a com um conjunto de reagentes que promovem a adesão entre a resina e a superfície. Para endurecer a resina, foi utilizado um fotopolimerizador à base de LED por cerca de 5 min.

Após a fixação da FBG, os parafusos foram passados por dentro do orifício das cerâmicas que compõe a pilha e posicionados de acordo com o comprimento projetado para eles e apresentado na Tabela 4.5. O parafuso 1 foi posicionado em 4,38 cm, enquanto o parafuso 2 foi posicionado em 13,10 cm, ambos foram fixados através das porcas confeccionadas para essa função.

Além do ajuste fino dos parafusos, as porcas foram apertadas de forma a esticar a fibra, evitando que a FBG envergue durante a variação do seu comprimento de onda no sentido negativo quando aplicada uma tensão CA. Seu valor original era de 1535,150 nm ( $T=25^{\circ}\text{C}$ ) e após esticada foi para 1536,270 nm ( $T=25^{\circ}\text{C}$ ). Esse valor foi monitorado pelo

interrogador SM125 do fabricante Micron Optics durante o processo de fixação. Ele possui uma faixa de trabalho de 1510 a 1590 nm, precisão de 10 pm e frequência de operação de 1 Hz [40].

A Figura 4.5 mostra uma fotografia da rede de Bragg colada e esticada entre os parafusos 1 e 2, após o ajuste final, com destaque para o final do parafuso 1 fixado na placa móvel de sustentação.

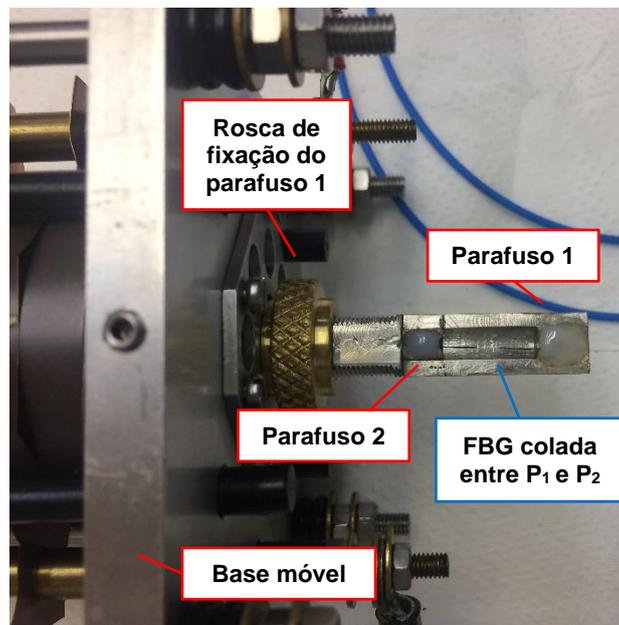


Figura 4.5 – FBG colada e esticada entre os parafusos.

A Figura 4.6 mostra o comprimento de onda de Bragg, visualizado através do *software* do interrogador SM125: MOI Enlight v1.7.3, antes e depois de esticar a FBG.

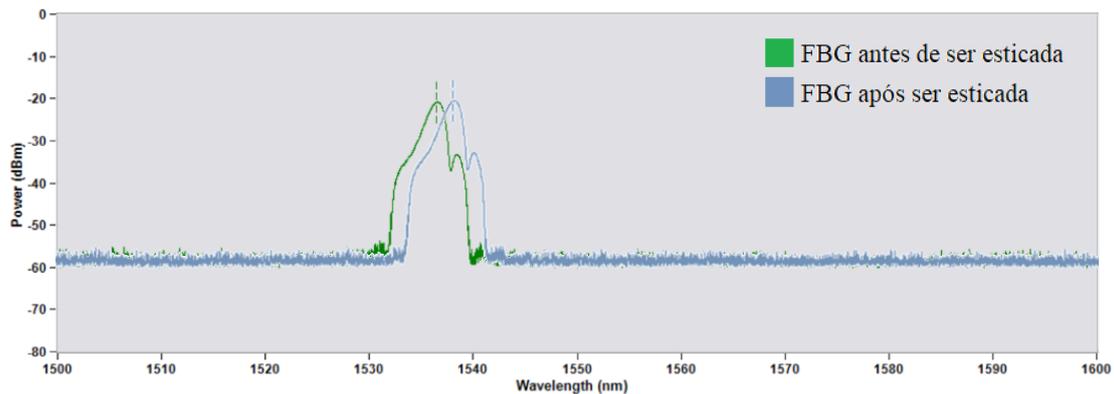


Figura 4.6 – Comprimento de onda de Bragg antes e após esticar a FBG.

No Capítulo 6 será apresentado o ensaio realizado para validar que os materiais projetados para o parafuso 1 e 2 conseguem compensar termicamente as variações do comprimento de onda de Bragg.

## 5 MEDIDAS DE TENSÃO E SEUS DISTÚRBIOS

Para utilizar o transformador óptico para medidas de tensão e seus distúrbios, é necessário conhecer qual a máxima tensão que pode ser aplicada no sensor, como o comprimento de Bragg varia em relação à tensão aplicada na entrada do TPO e qual a variação correspondente na tensão de saída.

Este capítulo apresenta os cálculos teóricos da máxima tensão a ser aplicada no transformador e suas sensibilidades em relação à tensão de entrada. Além disso, é apresentado o modelo desenvolvido para simular os distúrbios de tensão e aplicá-los no transformador óptico.

### 5.1 Máxima tensão de operação

O máximo campo elétrico que pode ser aplicado a uma cerâmica do tipo PZT é um dado fornecido por seu fabricante e a tensão máxima pode ser calculada pela seguinte equação:

$$V_{\max} = E_{\max} \omega_o \quad (5.1)$$

na qual  $\omega_o$  é a espessura do anel PZT e  $E_{\max}$  o campo elétrico máximo.

A Tabela 5.1 mostra os parâmetros da cerâmica SP-4 do fabricante Sparkler Ceramics utilizada neste trabalho. Substituindo os valores do máximo campo elétrico direto e reverso da Tabela 5.1 na Equação 5.1, podemos calcular a tensão máxima direta e reversa que pode ser aplicada ao PZT: 16 kV e 6,4 kV.

Tabela 5.1 – Parâmetros da cerâmica SP-4 [27].

Constante de carga piezoelétrica	$d_{33}=300$ pm/V
Constante de carga piezoelétrica	$d_{31}=-11,5$ pm/V
Máximo campo elétrico CC	$E_{\max-CC}= 1$ kV/mm
Máximo campo direto	$E_{\max-dir}= 2$ kV/mm
Máximo campo reverso	$E_{\max-rev}=800$ V/mm
Fator de qualidade mecânico	$Q_m=500$
Fator de dissipação elétrica	$\tan \delta =0,0031$
Frequência de ressonância	$f_R=186,09$ kHz
Frequência de antirressonância	$f_A=229,15$ kHz
Temperatura de Curie	$T_C=325$ °C
Espessura do PZT	$\omega_o=8$ mm

Conforme mostrado no Capítulo 4, os anéis PZT estão dispostos eletricamente em paralelo e conectados através de eletrodos feitos de chapas de cobre. Devido a essa configuração, uma tensão máxima de 4 kV<sub>RMS</sub>, equivalente a 5,66 kV<sub>pico</sub>, foi aplicada na entrada do transformador e cada uma das cerâmicas foi submetida a essa mesma tensão de entrada, garantido que elas não perderão suas propriedades piezoelétricas

Uma tensão de entrada maior poderia ser aplicada ao conjunto caso fosse utilizado uma cerâmica com maior constante de carga piezoelétrica ou, ainda, uma cerâmica de maior espessura. Ainda assim, a máxima tensão aplicada diretamente a sensores baseados em redes de Bragg e cerâmicas PZTs é na ordem de poucos kVs. Uma forma de se elevar a tensão limite do transformador é construindo um divisor capacitivo de potencial, conforme construído por GONÇALVES [8] e DANTE [9].

Nesse trabalho, não foi empregado nenhum tipo de divisor capacitivo de potencial para se elevar a máxima tensão de trabalho do transformador, uma vez que o objetivo aqui não é medir tensões mais elevadas e sim validar que o transformador consegue reproduzir em sua saída defeitos de tensão aplicados na entrada.

## 5.2 Sensibilidade da FBG relação a tensão de entrada

Quando uma tensão é aplicada aos terminais da pilha de cerâmicas, todos os anéis PZT se deslocarão proporcionalmente, conforme Equação 2.8. Este deslocamento será transferido para a FBG através dos parafusos P<sub>1</sub> e P<sub>2</sub> no qual a rede está colada.

$$\begin{aligned}\Delta L_{\text{FBG}} &= \Delta \omega \\ \Delta L_{\text{FBG}} &= n \Delta V_{\text{in}} d_{33}\end{aligned}\quad (5.2)$$

na qual n equivale ao número de cerâmicas que compõem a pilha de PZTs.

Substituindo a Equação 5.2 na equação de Bragg (Equação 2.2), considerando que as variações de temperatura da FBG já estão sendo compensadas conforme projetado no Capítulo 4, temos:

$$\frac{\Delta \lambda_B}{\lambda_B} = (1 - \rho_e) \frac{n \Delta V_{\text{in}} d_{33}}{L_{\text{FBG}}}\quad (5.3)$$

Reorganizando a Equação 5.3, obtemos a sensibilidade do transformador para uma tensão de entrada alternada.

$$\frac{\Delta \lambda_B}{\Delta V_{\text{in}}} = (1 - \rho_e) \frac{n d_{33}}{L_{\text{FBG}}} \lambda_B\quad (5.4)$$

O valor da sensibilidade pode ser obtido substituindo os valores da Tabela 5.1 e da Tabela 4.1 na Equação 5.4.

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\Delta V_{in}} = 232 \text{ pm/kV} \quad (5.5)$$

Isso significa que a cada 1 kV aplicado na entrada do transformador, uma variação proporcional e igual a 232 pm irá ocorrer no comprimento de onda de Bragg da FBG colada na estrutura mecânica. Para uma tensão de entrada igual a 4 kV<sub>RMS</sub>, equivalente a  $\pm 5,66$  kV<sub>pico</sub> uma variação de  $\pm 1,3$  nm irá ocorrer em  $\lambda_B$ .

Uma das formas de aumentar a sensibilidade é aumentando o número de cerâmicas na pilha, mas deve-se levar em consideração o peso e o volume do conjunto. Outra maneira é escolhendo uma cerâmica com uma maior constante de carga piezoelétrica, como por exemplo cerâmicas do tipo SP-5, apresentadas na Figura 2.11. Por fim, um menor comprimento da FBG também pode influenciar na sensibilidade, porém uma FBG de comprimento muito pequeno dificulta sua colagem entre os parafusos 1 e 2.

### 5.3 Relação entrada-saída do TPO

Nesse trabalho, foi utilizado um esquema de demodulação da rede de Bragg baseado em filtro sintonizável de Fabry-Perot, conforme o diagrama da Figura 2.5. A interseção entre os espectros da refletância da FBG e da transmitância do filtro é direcionada a um fotodetector.

Um fotodetector comercial acoplado a um amplificador de transimpedância (fabricante Thorlabs, modelo PDA10CS) foi utilizado para fornecer um sinal de tensão proporcional ao sinal óptico medido. A tensão de saída do amplificador de transimpedância é dada por:

$$V_{out} = A_R I_{PD} \quad (5.6)$$

na qual  $A_R$  é o ganho de transimpedância do amplificador igual a  $4,75 \times 10^6$  V/A  $\pm 5\%$  quando ajustado para 70dB, segundo o fabricante [38], e  $I_{PD}$  é a corrente no fotodetector.

A corrente no fotodetector pode ser obtida em função da potência de entrada do sinal óptico, conforme mostra a Equação 5.7.

$$I_{PD} = R(\lambda) P_\lambda \quad (5.7)$$

na qual  $R(\lambda)$  é a responsividade do fotodetector igual a 1,1 A/W para um comprimento de onda de 1550 nm, segundo o fabricante [38], e  $P_\lambda$  é a potência óptica incidente em um dado comprimento de onda.

Finalmente, a potência óptica incidente no fotodetector é dada por:

$$P_{\lambda} = k \Delta\lambda_B \quad (5.8)$$

na qual  $k$  é a sensibilidade resultante da convolução entre o espectro de refletância do FBG e o espectro de transmitância do filtro Fabry-Perot, igual a  $4,3 \times 10^{-8}$  W/nm.

Combinando as Equações (5.5) a (5.8) e substituindo as constantes citadas, obtemos a relação entre a tensão de entrada e saída do transformador óptico:

$$\frac{\Delta V_{out}}{\Delta V_{in}} = 52,12 \text{ mV/kV} \quad (5.9)$$

Isso significa que para cada 1 kV aplicado na entrada do sensor, temos uma saída de a 52,12 mV. Para uma tensão de entrada igual a 4 kV<sub>RMS</sub>, a tensão de saída do fotodetector após amplificada será igual a 208,48 mV<sub>RMS</sub>.

#### 5.4 Modelo para medidas dos distúrbios de tensão

Para validar que o transformador de potencial óptico projetado consegue reproduzir bem em sua saída distúrbios de tensão associados à qualidade de energia, foi projetado um esquema elétrico para que seja possível aplicar tais distúrbios no TPO. A Figura 5.1 apresenta um diagrama desse esquema.

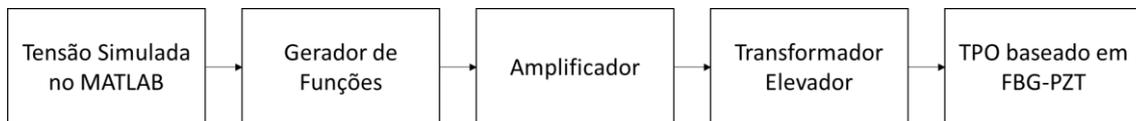


Figura 5.1 – Diagrama das etapas para aplicar os distúrbios de tensão no TPO.

O módulo Simulink do MATLAB foi escolhido como *software* para modelagem e simulação dos defeitos que se deseja medir. Os distúrbios simulados foram armazenados em um *pen-drive* e inseridos em um gerador de funções do fabricante Tektronix, modelo AFG1022. Como a saída do gerador é um sinal de baixa amplitude, este sinal foi direcionado a um amplificador de potência para, posteriormente, ser aplicado ao primário de um transformador elevador.

O transformador elevador tem a função de elevar a tensão aplicada em seu primário para até 4 kV<sub>RMS</sub>. Essa tensão será aplicada ao TP ótico e por isso foi limitada pela máxima tensão suportada pela pilha de cerâmicas.

Para validar o comportamento do transformador sob diferentes distúrbios, foram escolhidas as variações de tensão de curta duração, apresentadas na Tabela 2.2, por serem um dos distúrbios mais comuns nos sistemas elétricos de média tensão. Três diferentes fenômenos foram simulados: afundamentos, elevações e interrupções.

Uma alternativa a simulação dos distúrbios seria a utilização de dados de distúrbios reais fornecidos por concessionárias de energia elétrica. No entanto, por serem taxadas a cada variação na sua tensão de distribuição entregue aos consumidores, as concessionárias não tornam tais dados públicos e de fácil acesso.

A Figura 5.2 mostra o modelo criado no MATLAB/Simulink, ele utiliza um bloco pré-configurável de uma fonte de alimentação de 13,8 kV e 750 kVA, representando uma linha de distribuição, conectada a um bloco transformador abaixador ajustado para 13,8 kV : 220 V e 25 kVA, valor dos transformadores residenciais, alimentando um bloco de carga equivalente a um parque residencial.

No modelo, diferentes tipos de faltas são aplicados a linha de distribuição através de um bloco pré-configurável do Simulink, onde é possível simular faltas monofásicas, bifásicas e trifásicas. O sinal de saída da fase A, após o transformador abaixador, é exportado e seu dados são salvos para serem inseridos no gerador de funções.

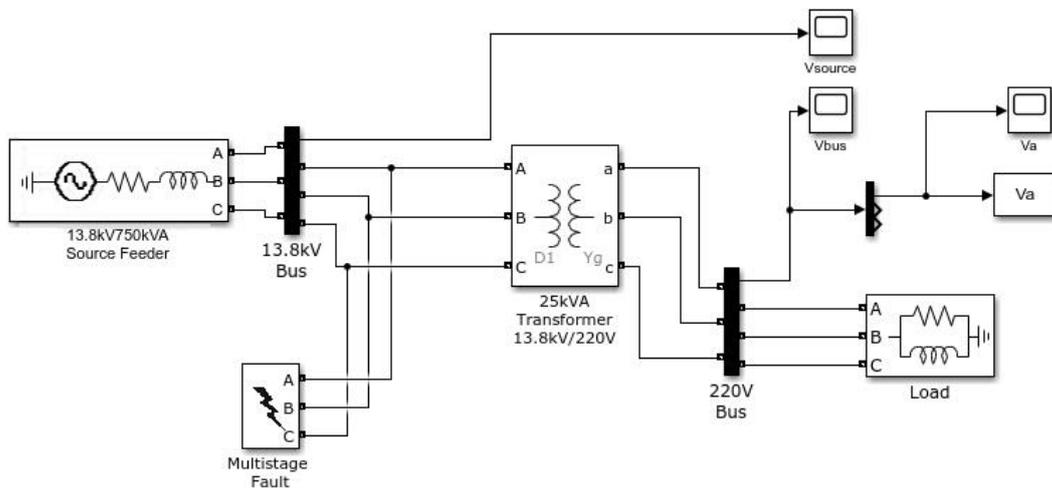


Figura 5.2 – Modelo para simulação de variações de tensão de curta duração.

Na primeira simulação, uma falta fase-terra é aplicada a linha de distribuição, ocasionando um afundamento de tensão. As faltas monofásicas geram afundamentos de tensão pouco severos, porém desequilibrados e assimétricos. Na segunda simulação, a elevação de tensão é causada por uma falta fase-fase com alta resistência de falha, enquanto a interrupção é causada por um curto-circuito fase-fase com terra no último modelo simulado.

As Figura 5.3 a Figura 5.5 mostram o ajuste do bloco de faltas do Simulink para cada simulação citada.

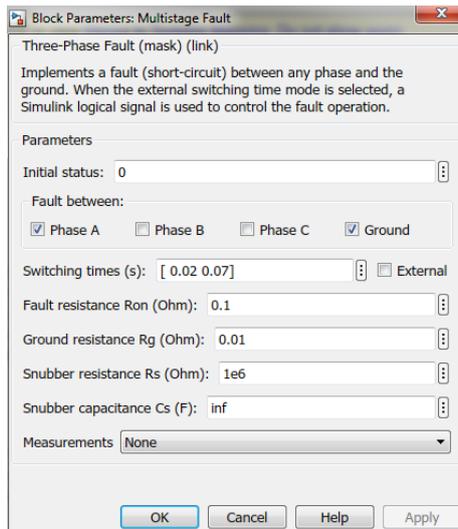


Figura 5.3 – Falta fase-terra que ocasiona um afundamento de tensão.

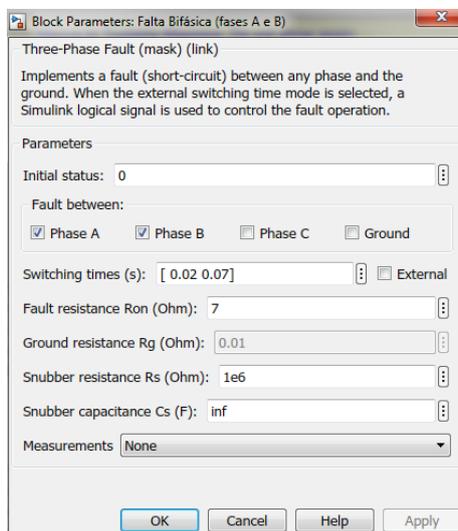


Figura 5.4 – Falta fase-fase ocasionando uma elevação de tensão.

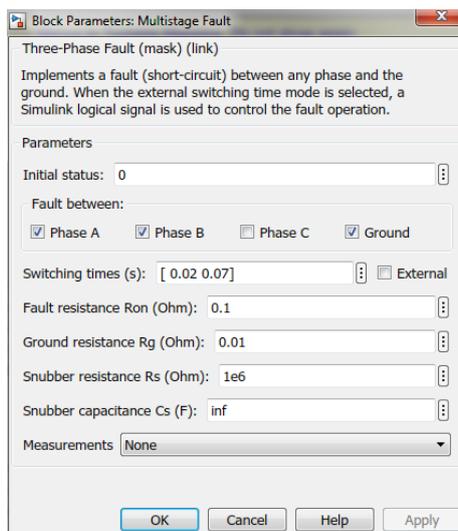


Figura 5.5 – Falta fase-fase com terra ocasionando uma interrupção de tensão.

## 6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos no ensaio de validação da compensação passiva de temperatura, a fim de comprovar que a configuração de materiais projetada no Capítulo 4 é capaz de compensar as variações do comprimento de onda de Bragg devido à temperatura.

Também serão apresentados os ensaios do transformador operando com as variações de tensão de curta duração na sua entrada. No primeiro ensaio, foi aplicada uma tensão de 4 kV<sub>RMS</sub> sem distúrbios e verificado o sinal obtido na saída do transformador. Em seguida, o mesmo conjunto foi ensaiado sob um afundamento, uma elevação e uma interrupção de tensão.

### 6.1 Ensaio da compensação de temperatura

O primeiro ensaio realizado tem como objetivo a validação do sistema de compensação passiva de temperatura apresentado no Capítulo 4. Neste ensaio, o transformador óptico foi imerso em um banho termostático controlado e submetido a variações de temperatura, enquanto o comprimento de onda de Bragg da FBG foi monitorado, conforme mostra a Figura 6.1.

Para demodulação do comprimento de onda foi utilizado o interrogador SM125 do fabricante Micron Optics. Um termômetro digital do fabricante Extech (modelo Datalogger – SDL200) foi utilizado para monitorar a temperatura durante todo o experimento e seu resultado foi salvo em um PC.

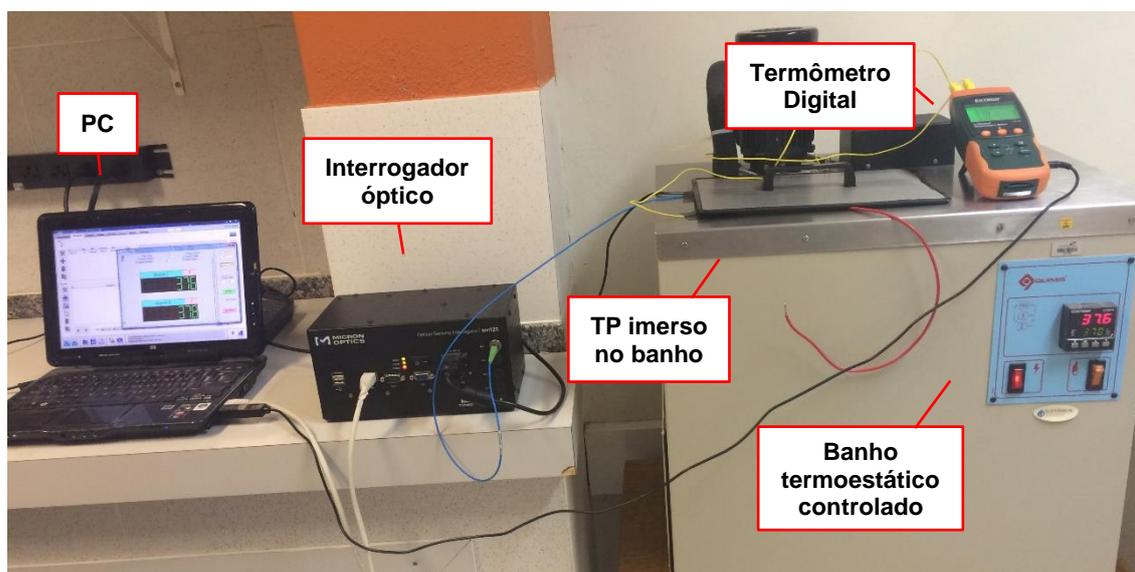


Figura 6.1 – Ensaio para validação da compensação de temperatura.

A Figura 6.2 mostra o comportamento do comprimento de onda da FBG durante o aumento de temperatura de 25°C a 50°C. Pode-se verificar que  $\lambda_B$  permaneceu constante durante todo o intervalo, com valor médio igual a 1536, 267 nm e um desvio padrão de 6 pm. Esse desvio é menor do que a precisão do próprio interrogador óptico utilizado para demodulação do sinal. Para as medidas de tensão, substituindo o valor do desvio de 6 pm na Equação 5.5, obtemos uma variação de tensão igual a 25,8 V, que é 0,18 % da tensão nominal de trabalho do transformador óptico (13,8 kV), ou seja, pode-se considerar desprezível.

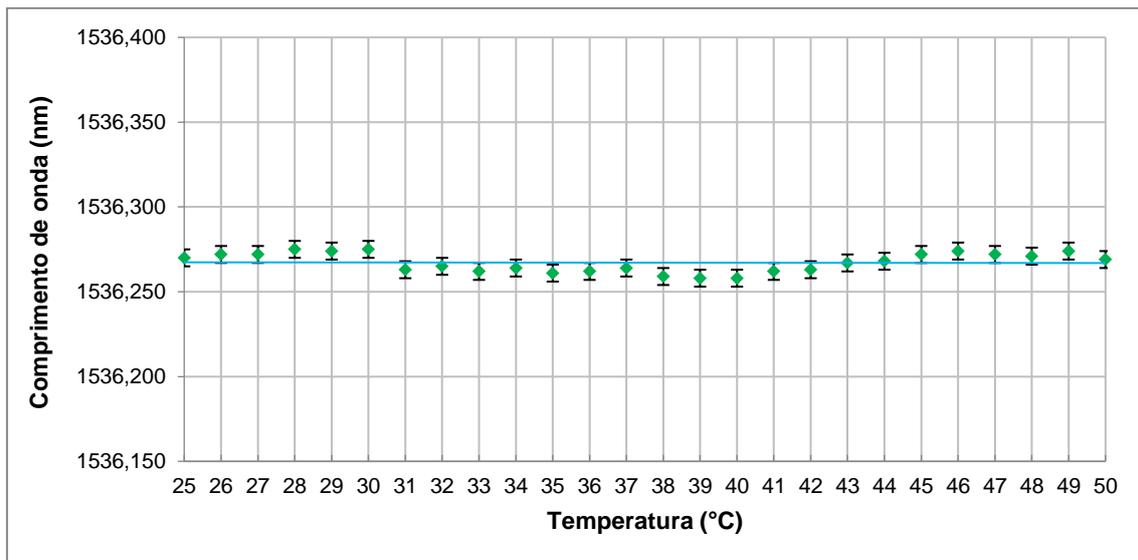


Figura 6.2 – Comprimento de onda de Bragg durante variação de temperatura.

O resultado obtido valida que a configuração de parafusos proposta consegue anular as variações do comprimento de onda de Bragg devido à temperatura. Esse método passivo de compensação de temperatura evita o uso de uma segunda FBG no sistema de compensação e se aproveita das peças utilizadas na fixação das cerâmicas piezoelétricas e dos parafusos utilizados para fixação da FBG.

O ajuste das peças que compõe o transformador pode ser feito para FBGs centradas em qualquer comprimento de onda, desde que seja possível obter uma combinação válida de materiais com diferentes coeficientes de dilatação térmica e comprimentos.

## 6.2 Ensaio do TPO com tensão CA

Para realizar o ensaio do transformador com tensão alternada, foi montado no MATLAB/Simulink o modelo apresentado na Figura 5.2. Inicialmente, nenhuma falta foi aplicada na linha com intenção de validar o esquema elétrico proposto.

A tensão simulada foi normalizada, armazenada em um *pen-drive* e reproduzida no gerador de funções AFG1022 do fabricante Tektronix. Em seguida, o sinal foi direcionado a um amplificador de potência do fabricante Machine Audimax (Modelo WVOX A2000 com saída máxima de 360 W) para posteriormente ser inserido em um transformador elevador monofásico do fabricante Isolet, com relação de transformação 127 V:23 kV, conforme esquema da Figura 6.3.

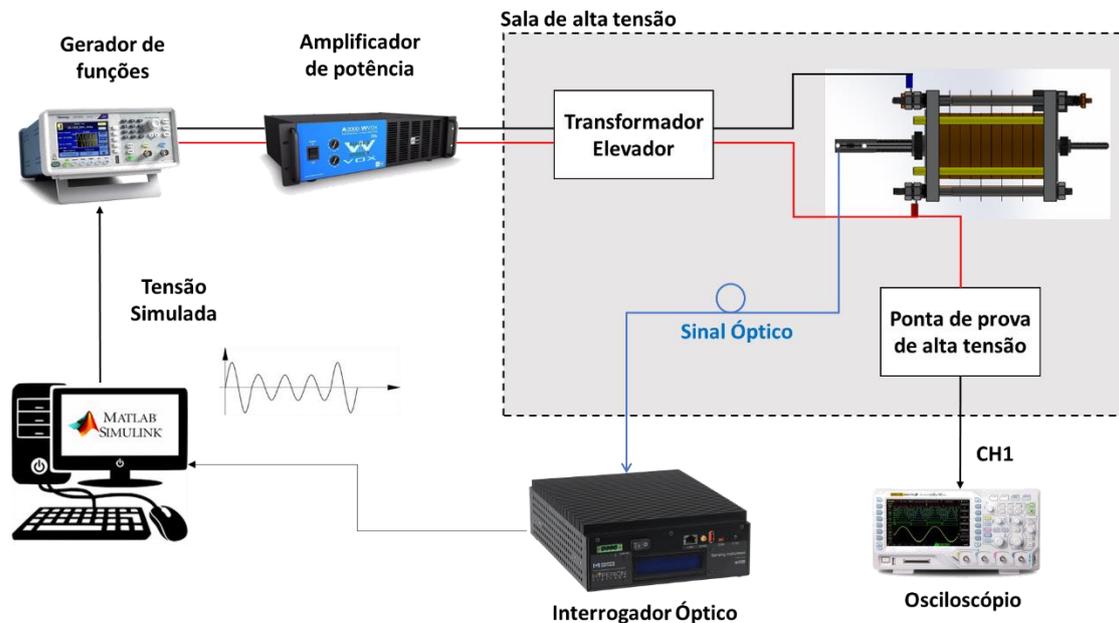


Figura 6.3 –*Setup* experimental para medidas de alta tensão.

Durante a aplicação da tensão nos terminais do transformador óptico, o comprimento de onda de Bragg foi monitorado com o interrogador óptico Hyperion si155 do fabricante Micron Optics. O diferencial desse interrogador é que ele possui uma frequência de amostragem de 1 kHz, sendo possível interrogar diretamente as variações de  $\lambda_B$  a 60 Hz, que é a frequência da tensão CA aplicada no TPO. Sua faixa de trabalho é de 1500 a 1600 pm, com precisão de 10 pm [41].

Além do sinal óptico, a tensão aplicada no transformador foi monitorada através de um ponta de prova de alta tensão com atenuação de 1:1000. Sua saída foi inicialmente direcionada para um multímetro digital do fabricante Fluke, indicado para trabalhar em conjunto com essa ponta, pois possui uma impedância de entrada igual a 10 M $\Omega$ , enquanto a impedância de saída da ponta é de 1,1 M $\Omega$ . Devido a isso, ele foi utilizado para ajustar corretamente a tensão RMS aplicada ao TPO.

Já o osciloscópio DS1102CA, do fabricante RIGOL, possui uma impedância de entrada de 1 M $\Omega$ , provocando uma queda de tensão no sinal proveniente da ponteira de

alta tensão. Devido a esse divisor de tensão causado pelas impedâncias dos equipamentos, o sinal monitorado pelo osciloscópio é 0,476 vezes menor que o sinal real aplicado no conjunto.

A Figura 6.4 mostra o TPO na sala de alta tensão do LIF onde fica localizado o transformador elevador. Também é possível observar as pontas de prova de alta tensão, o multímetro usado para o ajuste da tensão de trabalho e o sinal óptico a ser direcionado para o interrogador. Tanto o sinal óptico quanto o sinal da ponta de prova de alta tensão são estendidos para fora da sala onde fica o PC e os demais equipamentos.

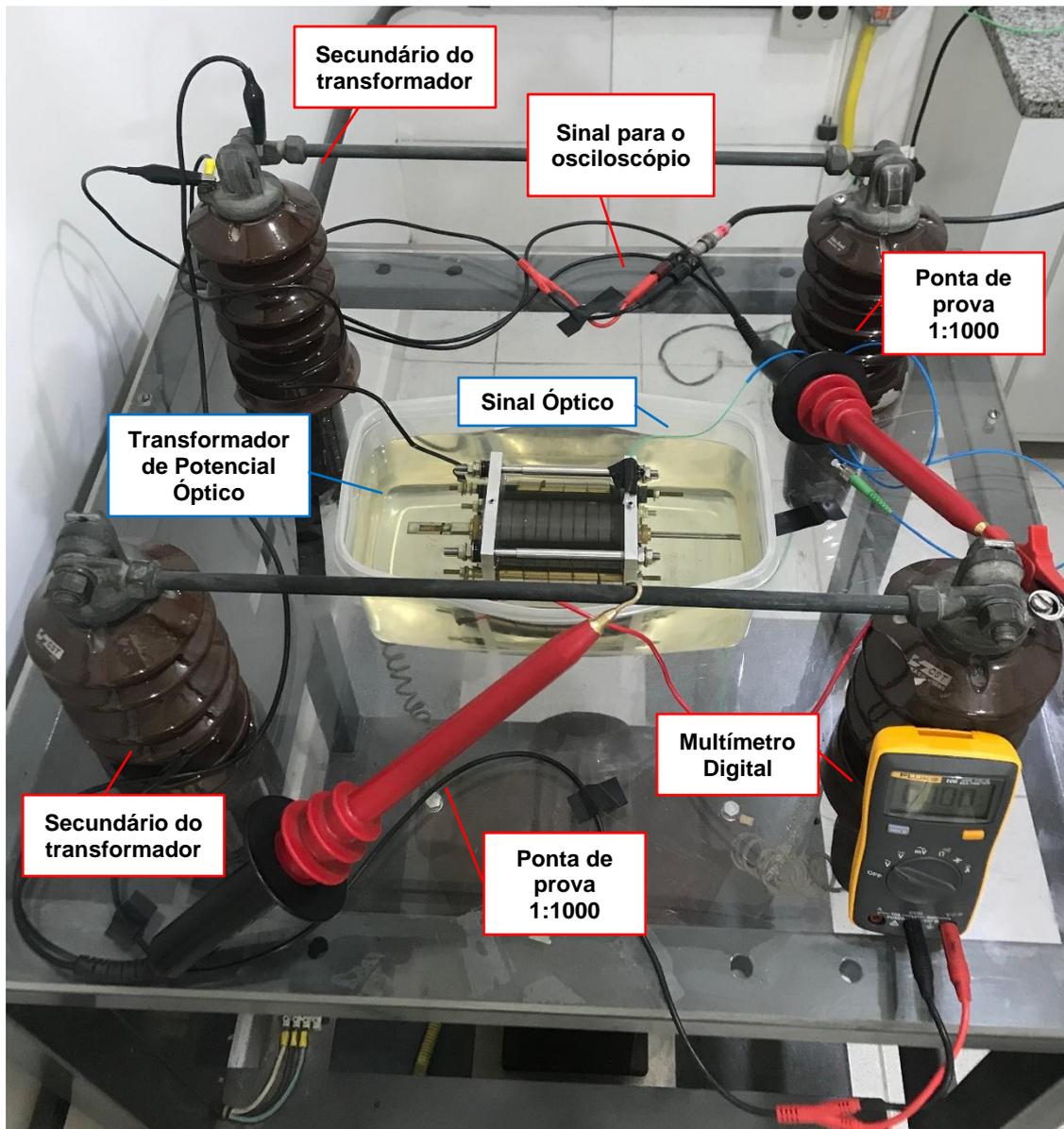


Figura 6.4 – Transformador de Potencial Óptico na sala de alta tensão.

A saída do gerador de funções foi ajustada para 8 V<sub>PP</sub>, equivalente a 2,8 V<sub>RMS</sub>. Esse sinal foi direcionado ao amplificador de potência, que foi ajustado para um ganho igual a 13,

o que garantiu na sua saída uma tensão de 36,8  $V_{RMS}$ . Esse valor foi inserido na entrada do transformador elevador, garantindo uma tensão de 4,1  $kV_{RMS}$  aplicada ao sensor.

A Figura 6.5 (a) mostra a tensão de saída gerador de funções/tensão de entrada do amplificador e a tensão de saída do amplificador. A reprodução adequada do sinal de entrada para a saída do amplificador é garantida por sua faixa de frequência, de 20 Hz a 20 kHz, e uma distorção harmônica  $<0,05\%$ .

A Figura 6.5 (b) mostra a tensão na entrada do TPO, medida pelo osciloscópio após passar pela ponta de prova 1:1000. Conforme explicado anteriormente, apesar de do sinal aplicado ser igual a 4,1  $kV_{RMS}$ , a tensão visualizada é aproximadamente metade desse valor, devido a impedância de entrada do osciloscópio.

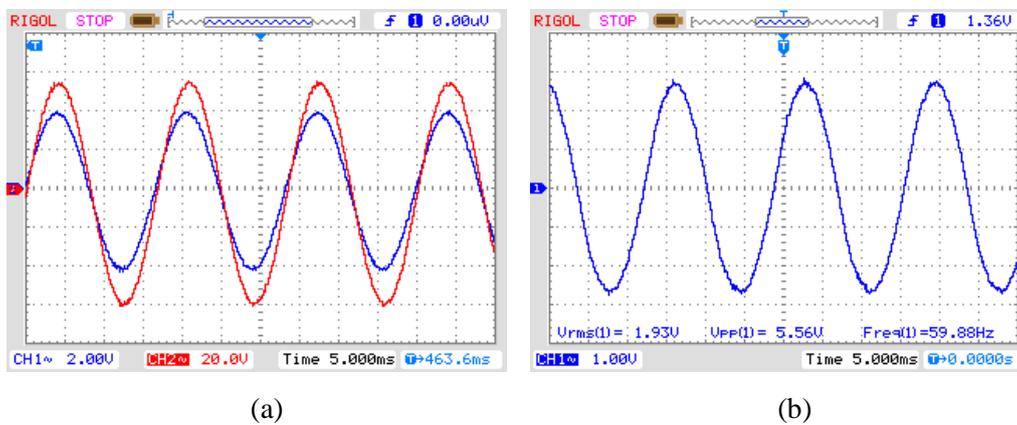


Figura 6.5 – (a) Tensão de saída gerador (CH1) e tensão de saída do amplificador (CH2),  
(b) Tensão de entrada do transformador óptico.

Durante a aplicação da tensão, o comprimento de onda de Bragg deve variar proporcionalmente ao valor aplicado. A Figura 6.6 mostra a variação do comprimento de onda de Bragg durante esse ensaio. A linha vermelha é uma regressão dos pontos capturados pelo interrogador.

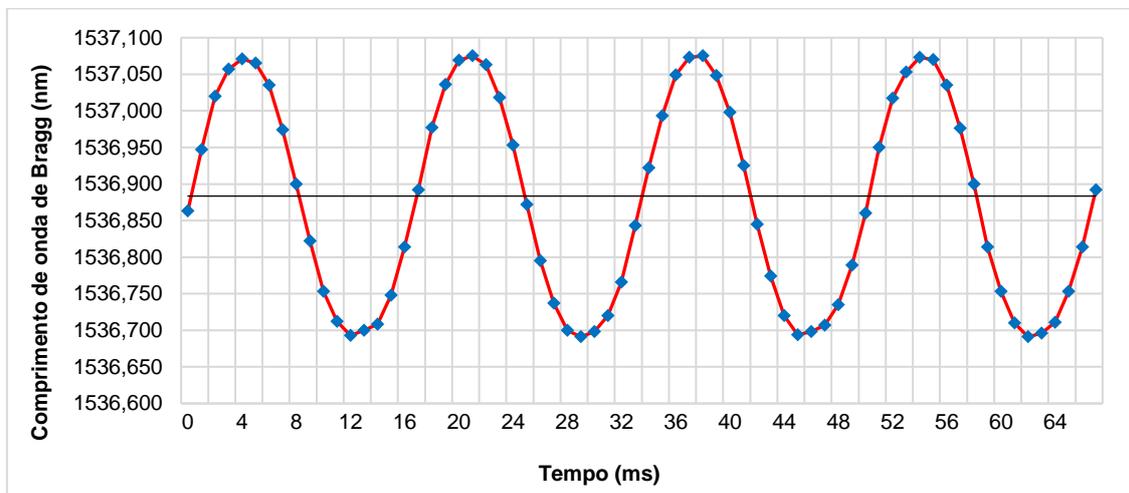


Figura 6.6 – Comprimento de onda de Bragg para uma tensão de entrada igual a 4,1  $kV_{RMS}$ .

Durante a aplicação de  $4,1 \text{ kV}_{\text{RMS}}$  no transformador, o comprimento de onda variou de  $1537,075 \text{ nm}$  a  $1536,691 \text{ nm}$ , isto é,  $384 \text{ pm}$  de pico-a-pico. O valor obtido é menor do que a sensibilidade teórica (Equação 5.5) e tal discrepância pode ser justificada pela montagem da estrutura mecânica do TPO.

O deslizamento do conjunto no sentido da placa de sustentação móvel é garantido pelo uso de o-rings em sua extremidade. Uma compressão maior do que o necessário nos o-rings pode impedir o conjunto mecânico de expandir livremente diminuindo assim a sensibilidade. Da mesma forma, ao deixar o lado móvel muito frouxo, a vibração das cerâmicas pode não ser transmitida corretamente para a rede de Bragg.

Para o próximo experimento, o transformador óptico foi retirado da sala de alta tensão e a pressão nos o-rings do lado da base móvel foi reduzida, afrouxando as porcas que os prendem. Espera-se que com essa mudança haja um aumento na sensibilidade do transformador, chegando até o valor teórico esperado.

### 6.3 Ensaios do TPO sob variações de tensão de curta duração

#### 6.3.1 Afundamento de tensão

A simulação da Figura 5.2 foi novamente executada, agora com a aplicação de uma falta monofásica na fase A da linha de  $13,8 \text{ kV}$  a fim de reproduzir um afundamento de tensão. A Figura 6.7 mostra a tensão fase-terra no barramento de  $220 \text{ V}$ . A falta foi aplicada por  $0,1 \text{ s}$  (no intervalo de  $0,04 \text{ s}$  a  $0,14 \text{ s}$ ), ocasionando uma queda de  $15\%$  nas fases A e B e de  $34\%$  na fase C.

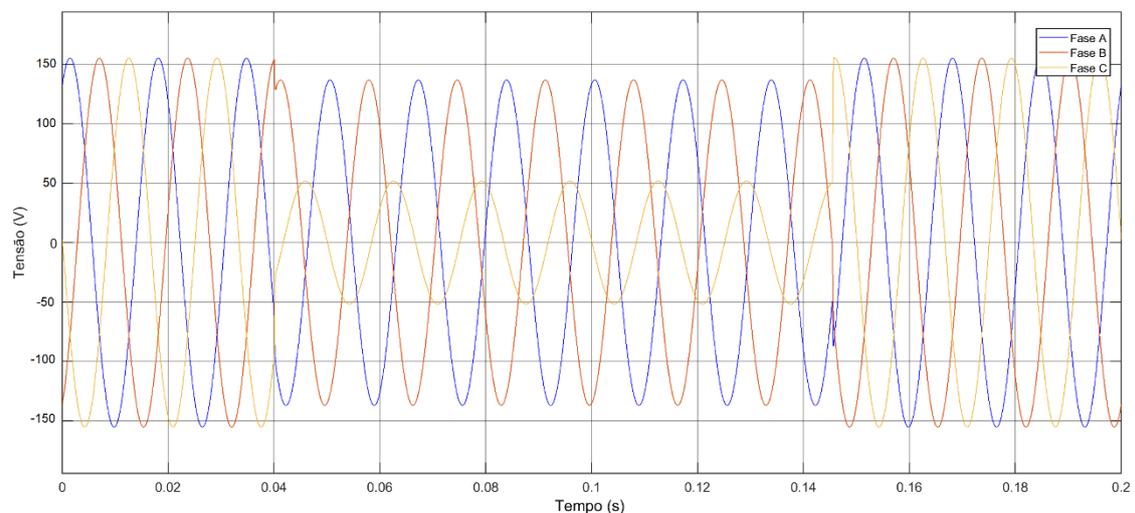


Figura 6.7 – Tensão no barramento de  $220 \text{ V}$  durante o afundamento.

A duração do afundamento por cerca de 6 ciclos equivale a uma variação de tensão de curta duração designada como instantânea, que vai de 0,5 a até 30 ciclos. Cargas eletrônicas, como computadores e controladores programáveis, são muito sensíveis a afundamentos de tensão. Seus componentes podem falhar quando a tensão cai para um valor abaixo de 85% do nominal por um ou dois ciclos

A Figura 6.8 mostra o sinal de saída do MATLAB/Simulink para a fase A. Esse sinal foi normalizado e inserido no gerador de funções para posteriormente ser direcionado ao amplificador e, em seguida, ao transformador elevador.

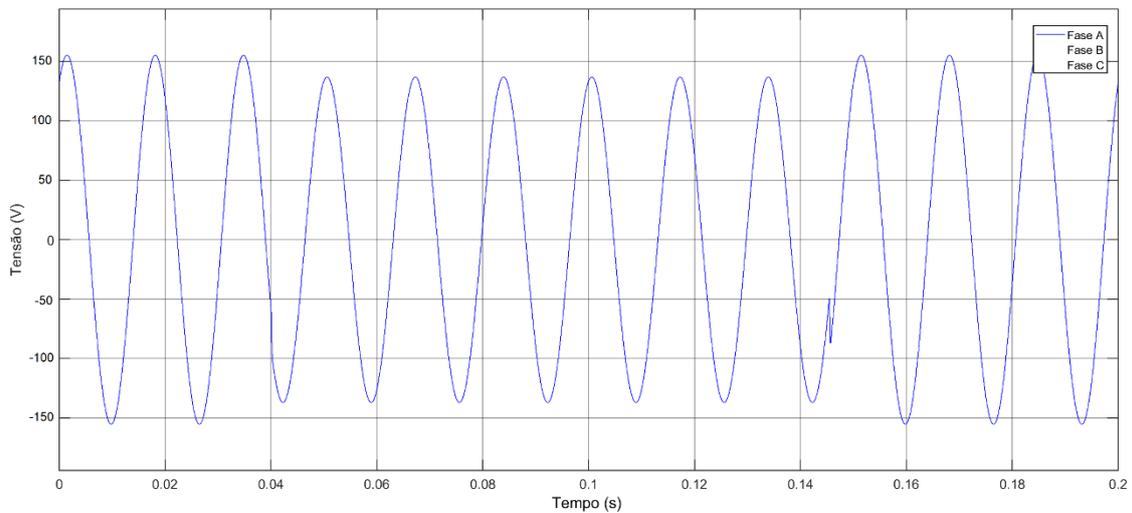


Figura 6.8 – Tensão na fase A durante o afundamento.

Durante a operação normal da linha, a tensão de entrada no gerador ficou mantida em  $2,8 V_{RMS}$ , o que resulta numa tensão de  $36,8 V_{RMS}$  na saída do amplificador de potência e  $4,1 kV_{RMS}$  aplicados ao TPO após passar pelo transformador elevador.

Durante a falta, a tensão na fase A caiu para aproximadamente 85% do seu valor original, garantindo uma tensão de  $2,5 V_{RMS}$  na entrada do gerador de funções, igual a  $31,3 V_{RMS}$  na saída do amplificador e  $3,5 kV_{RMS}$  aplicados ao transformador óptico.

A Tabela 6.1 resume os valores de tensão experimentais em regime permanente e durante o afundamento de tensão. É possível observar que a queda de tensão de 15% na fase A foi corretamente reproduzida na saída do amplificador e na entrada do TPO.

Tabela 6.1 – Tensões medidas experimentalmente durante o ensaio de afundamento de tensão.

	Tensão em regime permanente		Tensão durante o afundamento	
	Pico-a-pico	RMS	Pico-a-pico	RMS
Saída do gerador de funções/ Entrada do amplificador de potência	8,0 V	2,8 V	7,1 V	2,4 V
Saída amplificador de potência / Entrada do transformador elevador	104,1 V	36,8 V	88,5 V	31,3 V
Saída do transformador elevador / Tensão aplicada ao TPO baseado em FBG-PZT	-	4,1 kV	-	3,5 kV

Foi monitorado o comprimento de onda da FBG durante a aplicação da tensão com afundamento utilizando o mesmo interrogador óptico do fabricante Micron Optics empregado no primeiro experimento. A Figura 6.9 mostra esse resultado. Durante o período de queda de tensão de (0,04 s a 0,14 s) é possível observar que o comprimento de onda também foi reduzido.

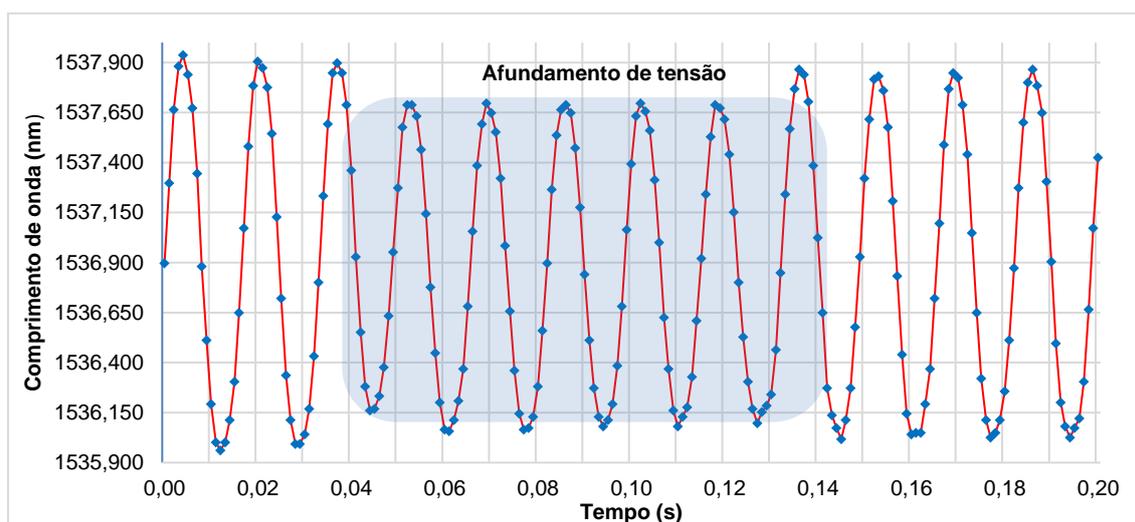


Figura 6.9 – Comprimento de onda de Bragg durante o afundamento de tensão.

Para uma tensão de entrada igual a 4,1 kV<sub>RMS</sub> em regime permanente,  $\lambda_B$  variou 988 pm. Esse valor é maior do que o encontrado no experimento anterior, antes do afrouxamento dos o-ring que prendem a base móvel. Esse resultado comprova que o conjunto estava muito comprimido, impedindo que as cerâmicas e demais peças do arranjo mecânico deslizassem livremente.

Durante o afundamento de tensão, a tensão de entrada do TPO caiu para 3,5 kV<sub>RMS</sub>, ocasionando uma variação de 826 pm no sinal óptico. Em resumo, a queda de 15% tensão na entrada do transformador óptico provocou uma queda de 16,4 % na variação do comprimento de onda de Bragg.

O valor obtido para a queda do comprimento de onda de Bragg foi 1,4% maior do que a queda de tensão aplicada no transformador. Essa discrepância pode ser atribuída à precisão do interrogador óptico utilizado para a demodulação do sinal. Além disso, é possível observar que o dente que ocorre na volta do afundamento na Figura 6.8 não é perceptível na Figura 6.9, uma vez que a taxa de amostragem do interrogador é de 1 kHz e o número de pontos não é suficiente para reproduzir esse transitório.

Fica claro que o uso de um interrogador comercial não é adequado para os ensaios de validação de distúrbios aplicados ao TPO. A maioria dos interrogadores comerciais não possuem banda de operação para medidas em alta frequência, nem resolução em comprimento de onda para essas aplicações. Devido a isso, um sistema de interrogação dedicado utilizando um filtro Fabry-Perot traz um ganho de qualidade na medida.

Esse método possui menor custo do que o uso de interrogadores ópticos comerciais e possui uma maior faixa de frequência, que nesse caso é limitada pela resposta do fotodetector e dos circuitos eletrônicos de amplificação utilizados.

Um novo *setup* experimental foi montado, substituindo o interrogador óptico pelo sistema de interrogação utilizando o filtro, de acordo com o modelo da Figura 2.5. Nesse novo *setup*, a saída do sistema de interrogação é direcionada ao mesmo osciloscópio que mede a tensão de entrada do transformador óptico, para comparar os dois sinais, conforme mostra a Figura 6.10.

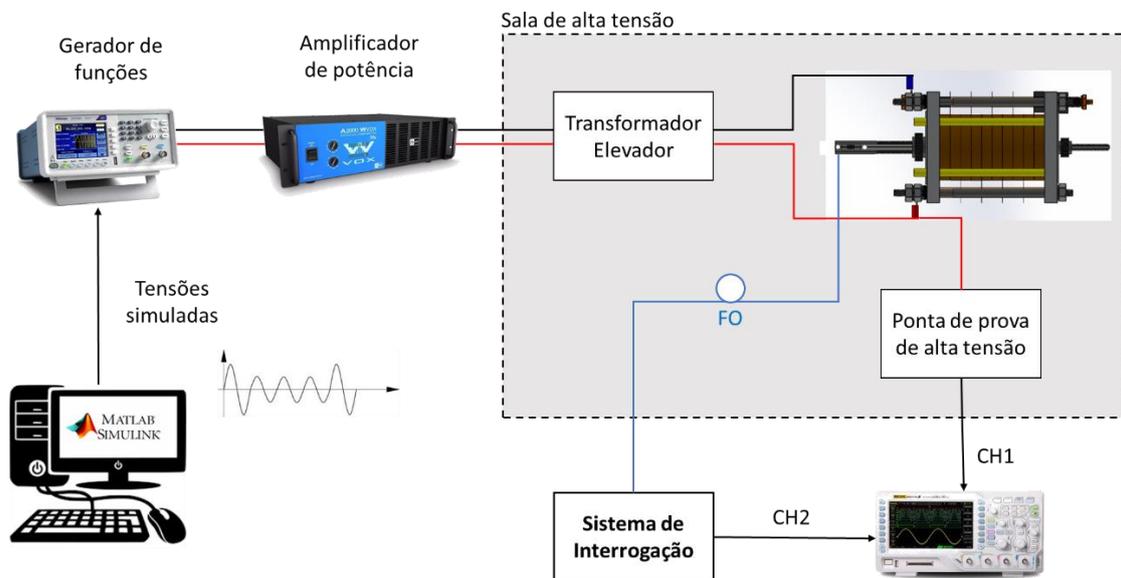


Figura 6.10 – *Setup* experimental incluindo sistema de interrogação.

O sistema de interrogação é composto por uma fonte de banda larga, um circulador óptico, um filtro Fabry-Perot e um fotodetector com amplificador. A Figura 6.11 mostra os equipamentos utilizados para a interrogação da FBG.

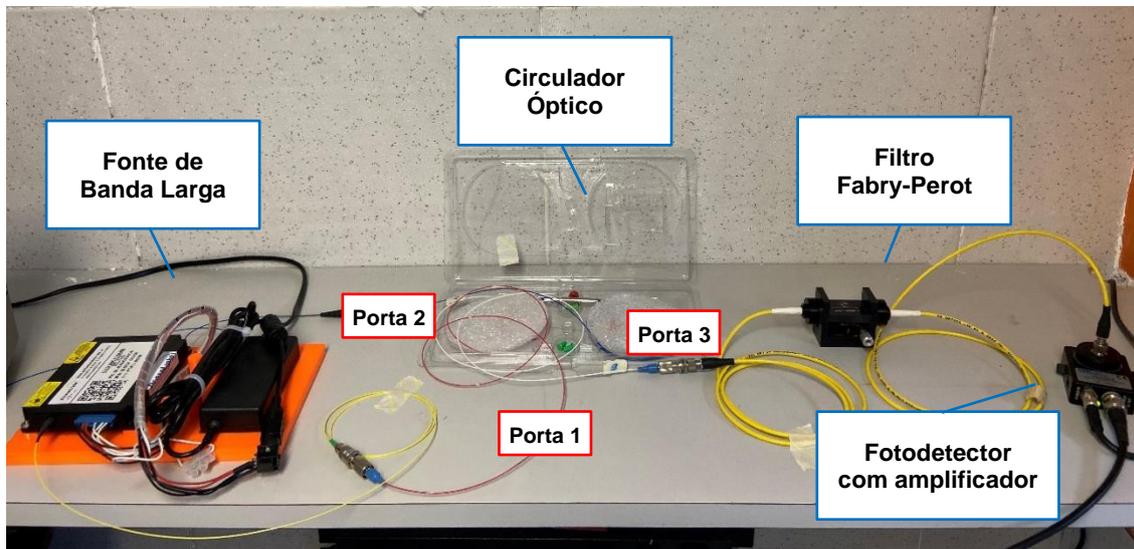


Figura 6.11 – Sistema de interrogação baseado em filtro Fabry-Perot.

A fonte de banda larga utilizada é um LED Superluminescente (SLED) do fabricante DenseLight, ela oferece uma potência máxima de saída igual a 50 mW e um espectro de emissão contínua de 1250 nm a 1700 nm. A Figura 6.12 mostra o gráfico espectral da fonte de banda larga visualizado no analisador de espectro óptico modelo MS9710C, do fabricante Anritsu.

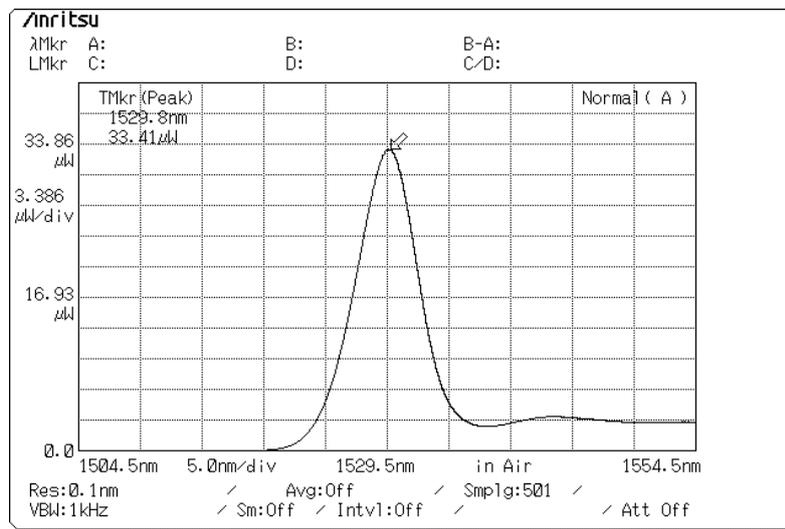


Figura 6.12 – Espectro óptico da fonte de banda larga, visualizado no OSA.

O sinal luminoso da fonte de banda larga é direcionado a FBG através da porta 1 do circulador óptico do fabricante Opto Link. O sinal refletido pela rede (localizada na

porta 2) é direcionado a porta 3, onde está conectado o filtro Fabry-Perot. O espectro óptico da FBG utilizada é mostrado na Figura 6.13.

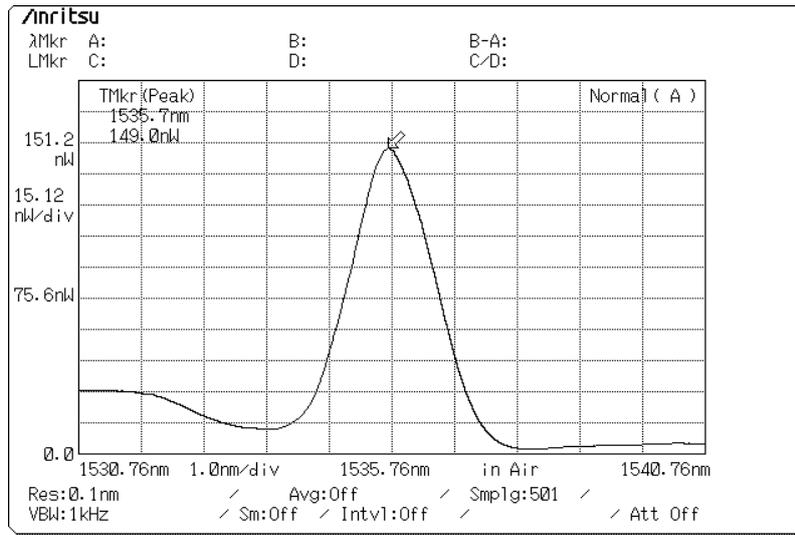


Figura 6.13 – Espectro óptico da FBG, visualizado no OSA.

O comprimento de onda central da FBG medido pelo OSA foi igual a 1535,7 nm ( $T=25^{\circ}\text{C}$ ). É possível observar uma discrepância de 570 pm em relação ao valor medido pelo interrogador óptico da Micron Optics ( $\lambda_B=1536,270$  nm). O valor do OSA foi utilizado como referência para ajuste do filtro Fabry-Perot, mas o valor do interrogador foi o utilizado nos cálculos teóricos apresentados.

A potência do sinal refletido pela FBG é de 149 nW. Esse valor depende da potência óptica emitida pela fonte de banda larga, das perdas nas emendas ópticas, das perdas no circulador e da refletância da rede de Bragg fabricada.

O filtro Fabry-Perot utilizado, do fabricante Oz Optics, possui um elemento rotativo que permite o ajuste manual do ângulo de incidência entre o feixe de luz incidente e o filtro. O filtro funciona com base no princípio de que, ao ajustar o ângulo de incidência entre o filtro e o feixe incidente, é possível controlar o comprimento de onda em que o filtro transmite.

O filtro foi posicionado 120 pm após o comprimento de onda central da rede de Bragg, sendo feito seu ajuste manual observando o espectro no OSA. A Figura 6.14 mostra o espectro do FFP.

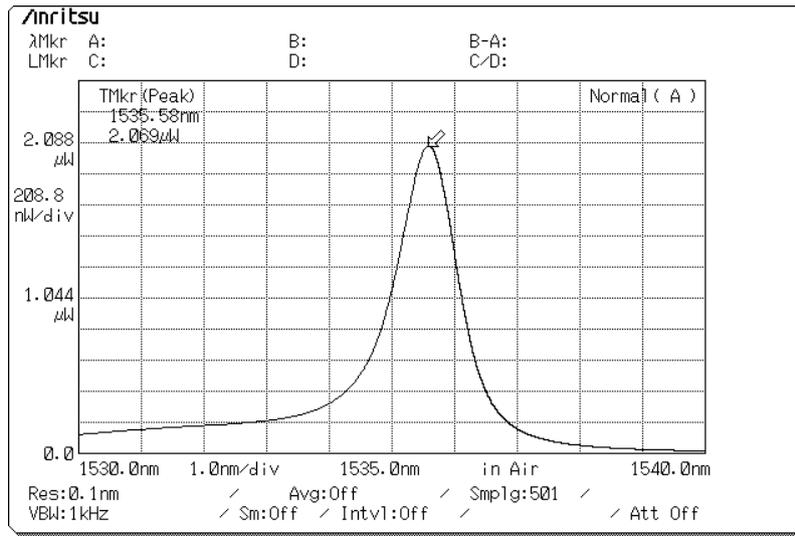


Figura 6.14 – Espectro óptico do filtro Fabry-Perot, visualizado no OSA.

O sinal direcionado ao fotodetector é a interseção entre o espectro de reflexão da FBG sensora com o espectro do filtro Fabry-Perot. A Figura 6.15 mostra o resultado dessa interseção: um espectro com comprimento de onda central igual a 1535,7 nm e potência óptica de 78,86 nW.

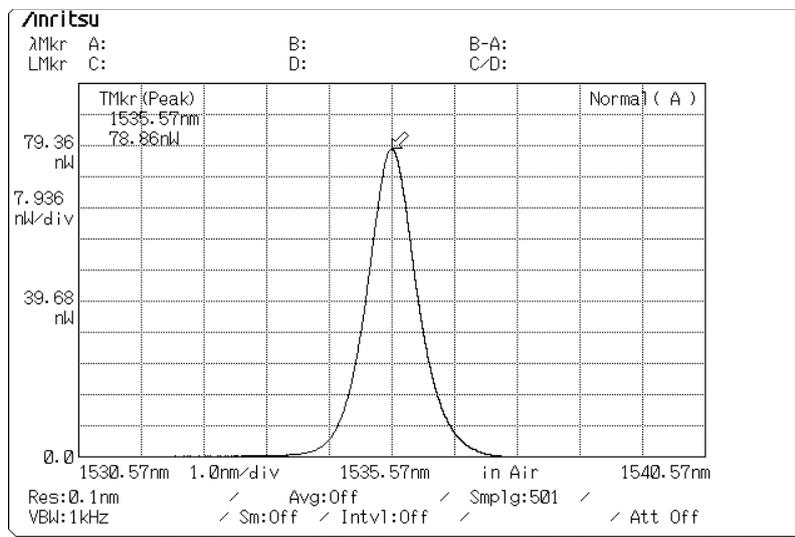


Figura 6.15 – Espectro da interseção entre o sinal refletido pela FBG e a transmitância do filtro Fabry-Perot, visualizado no OSA.

O fotodetector, utilizado para fornecer um sinal de tensão proporcional ao sinal óptico medido, possui um amplificador de transimpedância de ganho ajustável acoplado internamente. Dessa forma, o sinal de saída do esquema de demodulação é uma tensão proporcional às variações do comprimento de onda da FBG.

Para testar o novo *setup* experimental, uma nova falta monofásica foi aplicada na simulação do MATLAB/Simulink, com os parâmetros da Figura 5.3. A falta foi aplicada por 3 ciclos (20 ms a 70 ms), provocando um afundamento de tensão de 40% durante esse intervalo, caracterizando uma variação de tensão de curta duração do tipo instantânea, de acordo com a norma IEEE 1159 (Tabela 2.2). A Figura 6.16 mostra o sinal de saída do MATLAB/Simulink para a fase A.

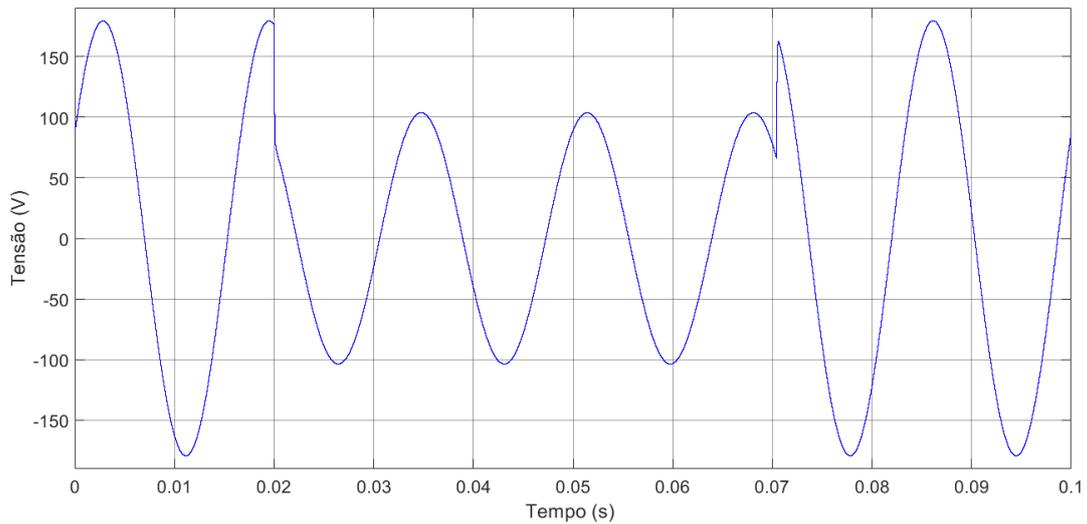


Figura 6.16 – Tensão na fase A durante segundo ensaio de afundamento de tensão.

A tensão de saída na fase A foi normalizada e inserida no gerador de funções, para em seguida ser direcionada ao amplificador de potência e por fim para o transformador elevador conectado ao TPO. A Figura 6.17 mostra a tensão de saída gerador de funções/tensão de entrada do amplificador junto com a tensão de saída do amplificador.

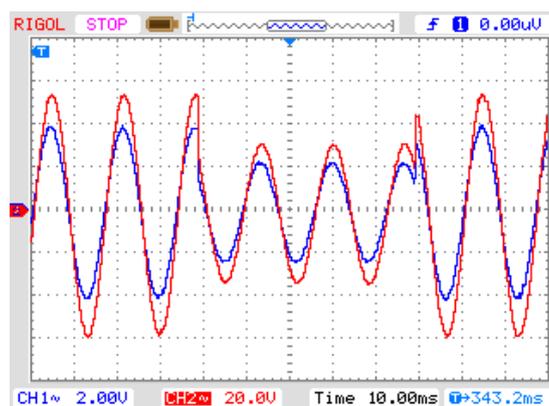


Figura 6.17 – Tensão de entrada (CH1) e tensão de saída do amplificador (CH2) durante o segundo ensaio de afundamento de tensão.

É possível observar que o afundamento de 40% da tensão nominal foi corretamente reproduzido no gerador de funções e na saída do amplificador de potência. Durante a operação normal da linha, a tensão de entrada do amplificador ficou igual a 2,8 V<sub>RMS</sub>,

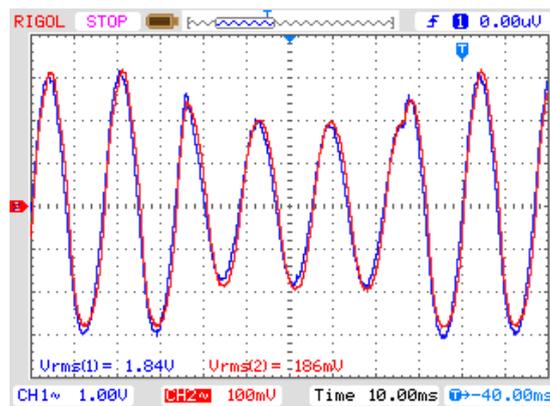
resultando em 40,2 V<sub>RMS</sub> na saída do amplificador de potência e 4,3 kV<sub>RMS</sub> na entrada do TPO. Durante a falta, a tensão de entrada do amplificador caiu para 1,7 V<sub>RMS</sub> e a tensão de saída para 24,23 V<sub>RMS</sub>, refletindo em 2,6 kV<sub>RMS</sub> no TPO. A Tabela 6.2 mostra o resumo das tensões em regime permanente e durante o afundamento de tensão.

Tabela 6.2 Tensões medidas experimentalmente durante o segundo ensaio de afundamento de tensão.

	Tensão em regime permanente		Tensão durante o afundamento	
	Pico-a-pico	RMS	Pico-a-pico	RMS
Saída do gerador de funções/ Entrada do amplificador de potência	8,0 V	2,8 V	4,8 V	1,7 V
Saída amplificador de potência / Entrada do transformador elevador	113,6 V	40,2 V	68,7 V	24,3 V
Saída do transformador elevador / Tensão aplicada ao TPO baseado em FBG-PZT	-	4,3 kV	-	2,6 kV

A Figura 6.18 mostra a tensão na entrada do TPO, após passar pela ponta de prova de alta tensão 1:1000, e a tensão de saída do TPO, que é a tensão de saída do fotodetector, resultado da demodulação óptica.

Na Figura 6.18 (a) temos o distúrbio completo na tela do osciloscópio ajustado para 10 mV/div no eixo do tempo, enquanto na Figura 6.18 (b) e Figura 6.18 (c) temos o início e fim do distúrbio, mostrado em detalhes com o osciloscópio ajustado para 5 mV/div no eixo do tempo.



(a)

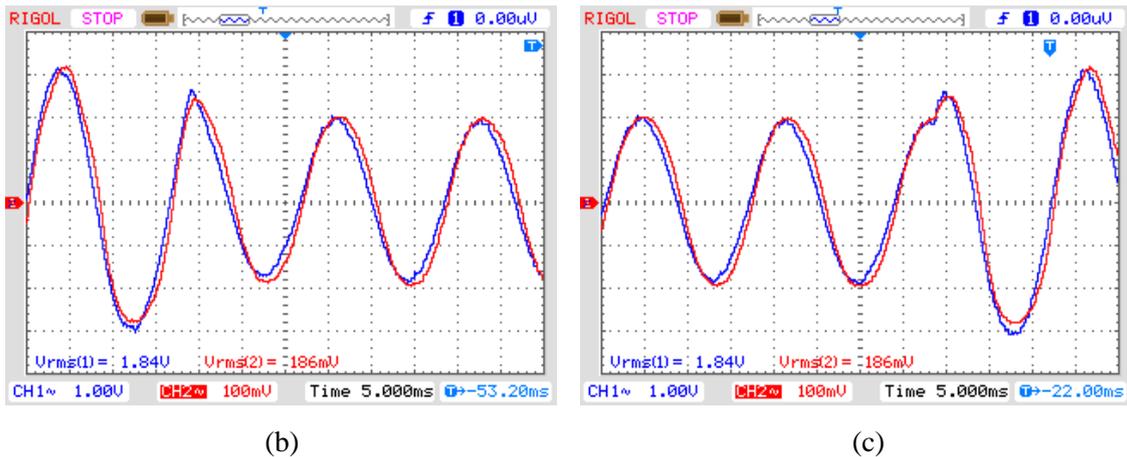


Figura 6.18 – Tensão de entrada do TPO (CH1) e tensão de saída do TPO (CH2) durante o segundo ensaio de afundamento de tensão. (a) Distúrbio completo, (b) Início do distúrbio, (c) Final do distúrbio.

A partir da análise dos pontos das curvas de tensão obtidas no osciloscópio, é possível concluir que afundamento de 40% da tensão de entrada foi corretamente reproduzido na saída do TPO. Para verificar a reprodutibilidade, foi calculada a relação de entrada-saída. Uma vez que a tensão de entrada real medida pela ponta de prova de alta tensão apresenta uma atenuação de 1:1000, a relação entre a tensão de saída e entrada é igual a 50,54 mV/kV. O erro relativo é de 3,03% em relação ao valor teórico da Equação 5.9. O deslocamento de fase foi igual a 8,63 °.

Outro método utilizado para verificar a reprodutibilidade foi a medição da distorção harmônica total (THD – *Total Harmonic Distortion*) da tensão de saída em comparação com o THD da entrada. Para este cálculo, é necessário obter a Transformada Rápida de Fourier (FFT – *Fast Fourier Transform*) tanto da entrada quanto da saída do transformador óptico. A Figura 6.19 mostra a FFT da entrada e saída do TPO até o 10º harmônico.

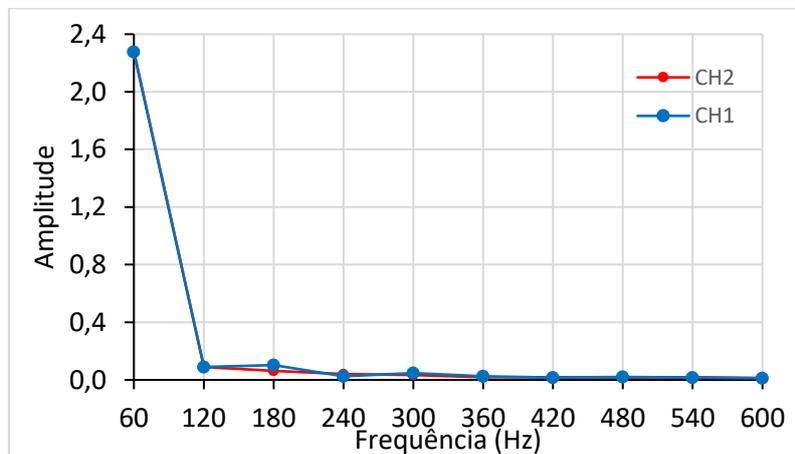


Figura 6.19 – FFT da entrada e saída do TPO durante o afundamento de tensão.

Os três primeiros harmônicos são os que possuem maiores contribuições no sinal de entrada e saída, o que era esperado, já que o afundamento possui principalmente formas de onda senoidais de 60 Hz. No entanto, uma análise mais aprofundada foi necessária para verificar se TPO introduz possíveis distorções de alta frequência.

A partir dos componentes harmônicos da FFT, o THD da tensão de entrada do TPO foi calculado e o valor obtido foi igual a 5,87 % enquanto o THD da tensão de saída foi de 6,65%. Com esse resultado, concluímos que o transformador óptico introduziu uma distorção de 0,77 % no sinal original.

### 6.3.2 Elevação de tensão

Para simular um distúrbio de elevação de tensão, o modelo da Figura 5.2 do MATLAB/Simulink foi novamente executado, agora com a aplicação de uma falta fase-fase entre as linhas A e B utilizando os parâmetros da Figura 5.4.

Nessa simulação, ocorre um afundamento de tensão nas linhas A e B que foram curto-circuitadas e uma elevação de tensão na fase C. A falta foi aplicada por 3 ciclos (0,02 s a 0,07 s), ocasionando uma elevação instantânea, dentro do conjunto de variações de tensão de curta duração, segundo a norma IEEE 1159 (Tabela 2.2). A Figura 6.20 mostra a tensão de saída do MATLAB/Simulink para a fase C.

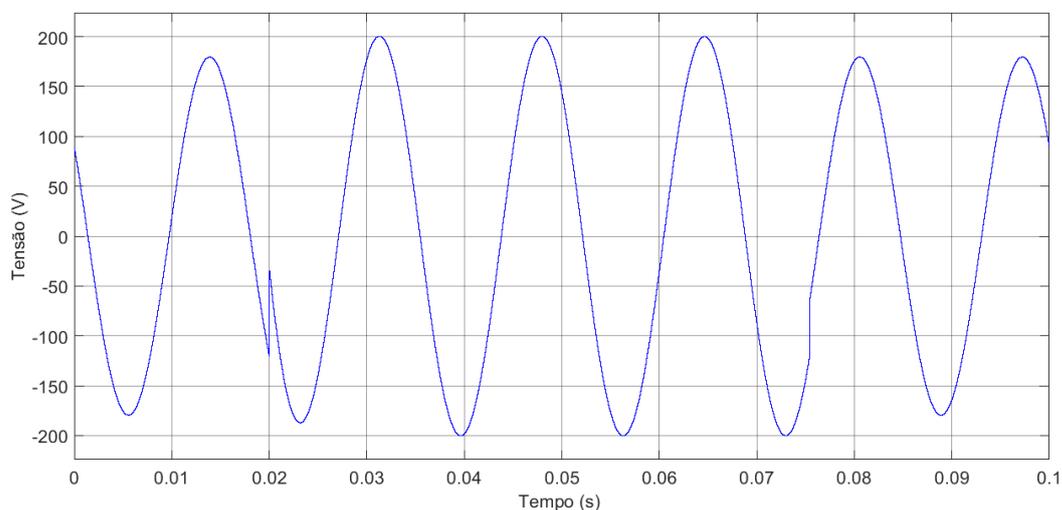


Figura 6.20 – Tensão na fase C durante o ensaio de elevação de tensão.

Houve um aumento de 11,2 % na tensão da fase C durante a falta aplicada. O sinal da simulação foi normalizado e inserido no gerador de funções para em seguida ser direcionado ao amplificador de potência. A Figura 6.21 mostra a tensão de saída do gerador/tensão de entrada do amplificador e a tensão de saída do amplificador.

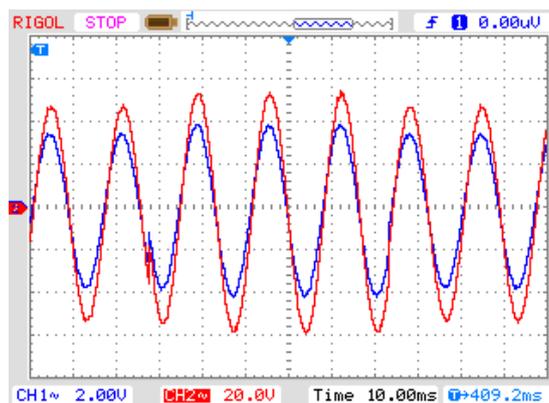


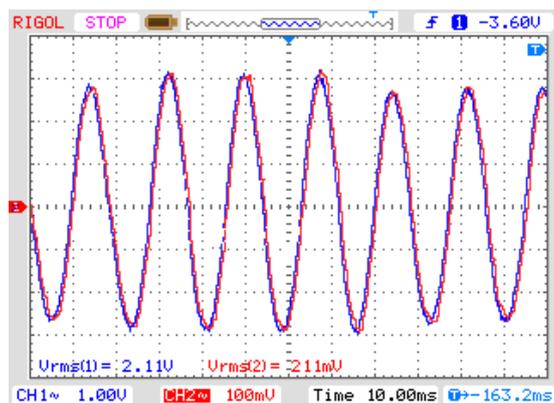
Figura 6.21 – Tensão de entrada (CH1) e tensão de saída do amplificador (CH2) durante a elevação de tensão.

Antes da elevação de tensão, a tensão de entrada do amplificador ficou igual a  $2,5 V_{RMS}$ , resultando em  $35,9 V_{RMS}$  na saída do amplificador de potência e  $3,8 kV_{RMS}$  na entrada do TPO. Durante a falta, a tensão de entrada do amplificador subiu para  $2,8 V_{RMS}$ , já a tensão de saída foi para  $40,0 V_{RMS}$ , refletindo em  $4,0 kV_{RMS}$  na entrada TPO. O resumo das tensões em regime permanente e durante a elevação de tensão é apresentado na Tabela 6.3.

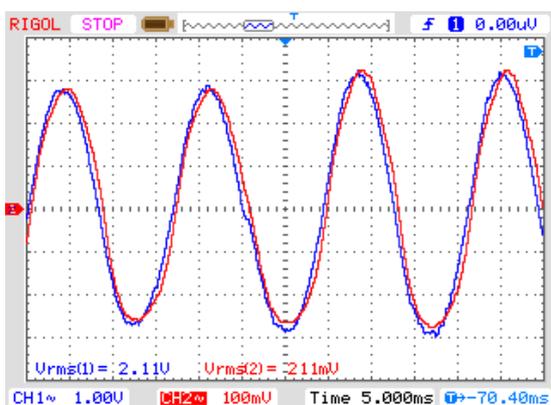
Tabela 6.3 – Tensões medidas experimentalmente durante o ensaio de elevação de tensão.

	Tensão em regime permanente		Tensão durante a elevação	
	Pico-a-pico	RMS	Pico-a-pico	RMS
Saída do gerador de funções/ Entrada do amplificador de potência	7,2 V	2,5 V	8,0 V	2,8 V
Saída amplificador de potência / Entrada do transformador elevador	101,6 V	35,9 V	113,2 V	40,0 V
Saída do transformador elevador / Tensão aplicada ao TPO baseado em FBG-PZT	-	3,5 kV	-	4,0 kV

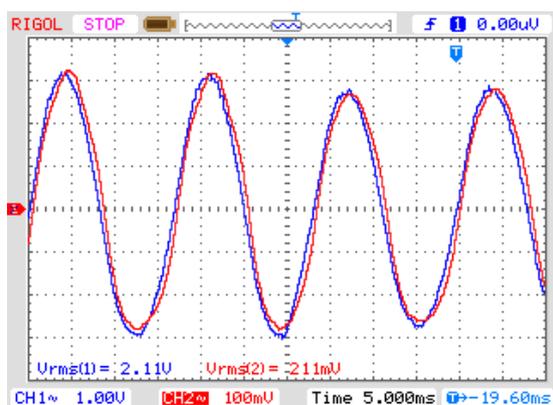
O aumento de 11,2 % na tensão de entrada do amplificador de potência foi corretamente reproduzido em sua saída e na entrada do transformador óptico. O sinal de entrada do TPO foi medido com a ponta de prova 1:1000 e conectado ao osciloscópio no CH1, enquanto o sinal de saída, após passar pelo sistema de interrogação da rede de Bragg, foi medido no CH2. A Figura 6.22 mostra a tensão de entrada e saída do transformador óptico.



(a)



(b)



(c)

Figura 6.22 – Tensão de entrada do TPO (CH1) e tensão de saída do TPO (CH2) durante a elevação de tensão. (a) Distúrbio completo, (b) Início do distúrbio, (c) Final do distúrbio.

A elevação de tensão instantânea que ocorre na entrada do transformador óptico foi corretamente reproduzida em sua saída. A relação entrada-saída foi de 50 mV/kV, o que equivale a um erro relativo de 4,07 % em comparação à relação teórica calculada na Equação 5.9. O deslocamento de fase entre os dois sinais foi o mesmo que o obtido no experimento anterior: 8,63 °.

Para verificar a reprodutibilidade da medida, foi realizada a FFT da tensão de entrada e saída do transformador óptico até o 10º harmônico. A Figura 6.23 mostra o resultado obtido. O THD da tensão de entrada foi igual a 13,85 %, já o da tensão de saída foi de 15,72 %, isto é, uma diferença de 1,87 % introduzida pelo transformador óptico.

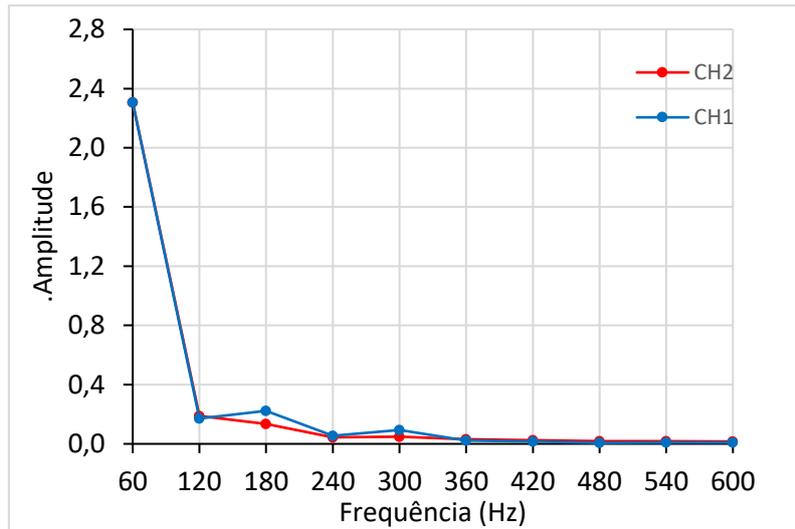


Figura 6.23 – FFT da entrada e saída do TPO durante a elevação de tensão.

### 6.3.3 Interrupção de tensão

Para completar os ensaios do transformador óptico sob variações de tensão de curta duração, foi simulado no MATLAB/Simulink uma falta fase-fase com terra utilizando os parâmetros da Figura 5.5. Essa simulação provocou uma interrupção nas tensões da fase A e B e um afundamento de tensão na fase C. A Figura 6.24 mostra a tensão na fase A durante a aplicação da falta por 3 ciclos (0,02 s a 0,07 s).

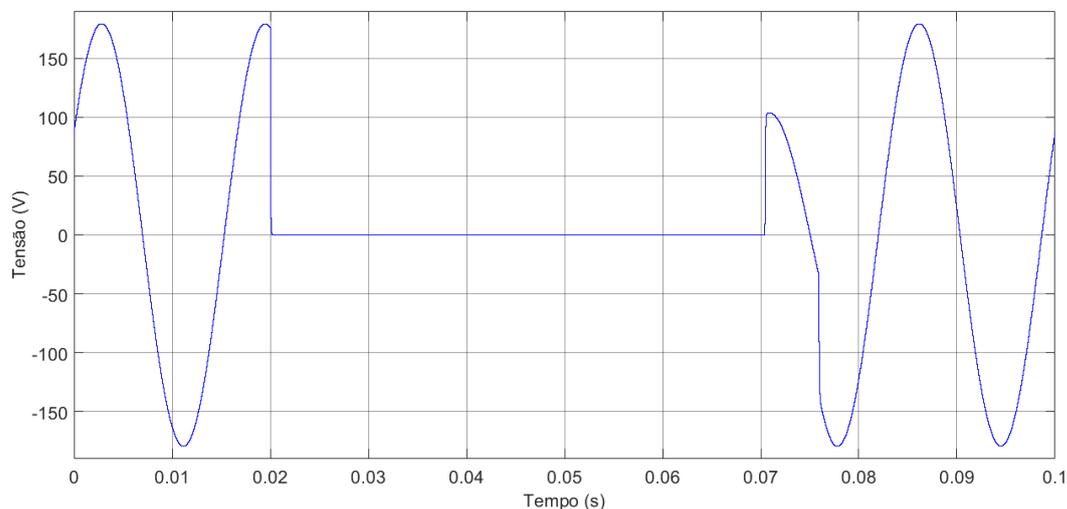


Figura 6.24 – Tensão na fase A durante ensaio de interrupção de tensão.

O distúrbio é considerado uma interrupção quando a tensão cai para menos de 10% do seu valor nominal. No modelo simulado, a tensão caiu para zero por 50 ms, caracterizando uma interrupção momentânea de acordo com a norma IEEE 1159 (Tabela 2.2).

Novamente, a tensão da fase A foi normalizada e inserida no gerador de funções para ser direcionado ao amplificador de potência. A tensão de saída do gerador/tensão de entrada do amplificador e a tensão de saída do amplificador é mostrada na Figura 6.25.



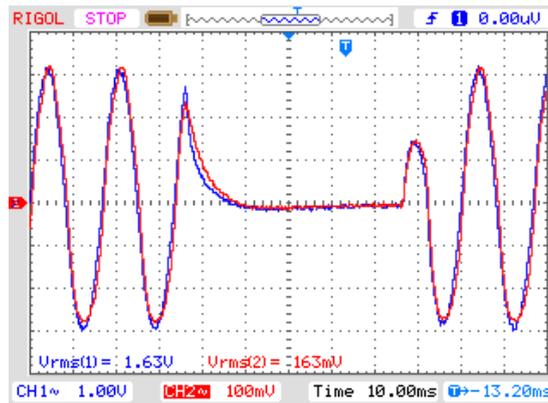
Figura 6.25 – Tensão de entrada (CH1) e tensão de saída do amplificador (CH2) durante interrupção de tensão.

Na operação normal, a tensão de entrada do amplificador era de 2,8 V<sub>RMS</sub>, o que resultou em uma saída de 110,5 V<sub>RMS</sub> no amplificador de potência e uma tensão de 4,0 kV<sub>RMS</sub> na entrada do transformador óptico. Durante a interrupção de tensão, todos esses valores foram a zero e, depois de um curto transiente, retornaram ao seu valor normal de operação. A Tabela 6.4 mostra as tensões medidas experimentalmente.

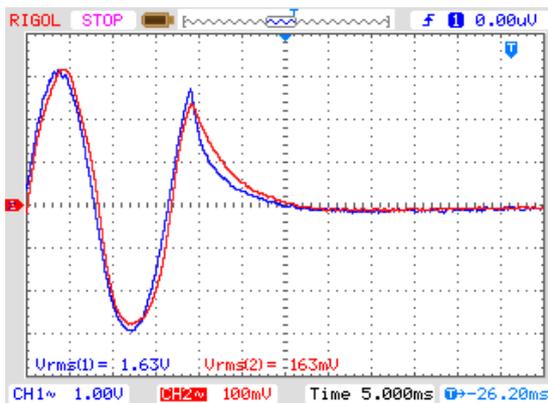
Tabela 6.4 – Tensões medidas experimentalmente durante o ensaio de interrupção de tensão.

	Tensão em regime permanente		Tensão durante a interrupção	
	Pico-a-pico	RMS	Pico-a-pico	RMS
Saída do gerador de funções/ Entrada do amplificador de potência	8,0 V	2,8 V	0 V	0 V
Saída amplificador de potência / Entrada do transformador elevador	110,5 V	39,1 V	0 V	0 V
Saída do transformador elevador / Tensão aplicada ao TPO baseado em FBG-PZT	-	4,0 kV	-	0 kV

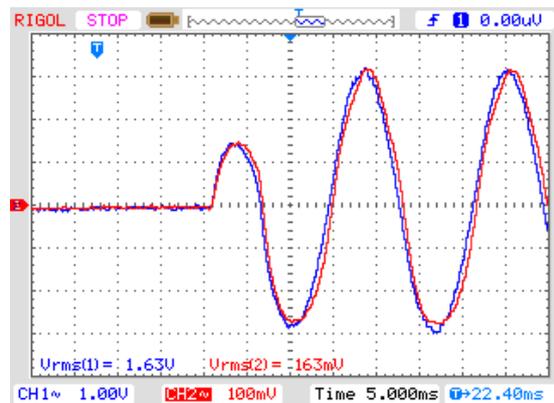
A Figura 6.26 mostra a tensão de entrada e saída do transformador óptico, com destaque para o início e fim do distúrbio. Mais uma vez, nesse ensaio foi utilizado o esquema de demodulação baseado no filtro Fabry-Perot que resulta em uma tensão de saída proporcional a variação do comprimento de onda da FBG colada no arranjo mecânico do transformador.



(a)



(b)



(c)

Figura 6.26 – Tensão de entrada do TPO (CH1) e tensão de saída do TPO (CH2) durante a interrupção de tensão. (a) Distúrbio completo, (b) Início do distúrbio, (c) Final do distúrbio.

É possível observar que o transiente que ocorre antes e depois da interrupção de tensão foi atenuado após passar pelo transformador elevador, uma vez que ele é fabricado para trabalhar com frequência nominal de 60 Hz. Contudo, ainda é possível visualizar o momento da falta, quando a tensão começa a cair até chegar a zero, e o retorno à operação normal, quando a tensão sai de zero e começa a retornar para seu valor nominal.

A relação entrada-saída do transformador novamente foi igual a 50 mV/kV, o que significa um erro relativo de 4,07 % comparado à relação teórica calculada na Equação 5.9. Não houve diferença no deslocamento de fase em relação aos ensaios anteriores.

Foi calculada a FFT do sinal de entrada e saída do transformador óptico e comparadas no gráfico da Figura 6.27. O THD do sinal de entrada foi igual a 9,53 % enquanto o THD do sinal de saída foi de 11,01 %. A diferença entre os dois valores é igual a 1,48 %.

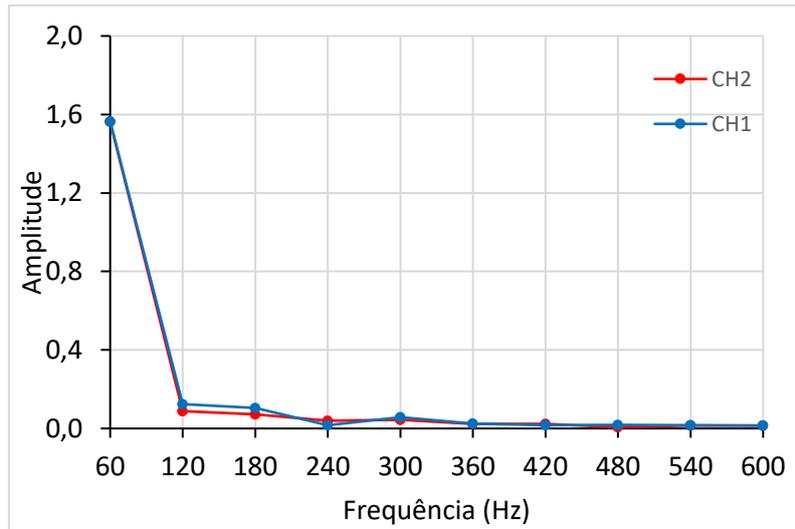
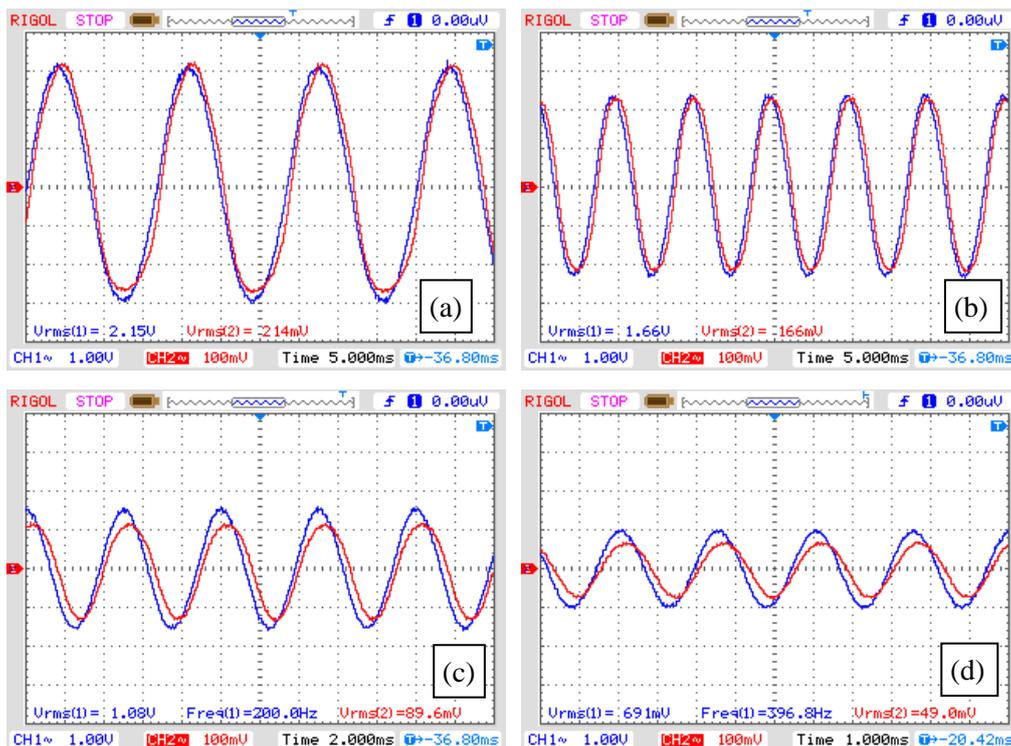


Figura 6.27 – FFT da entrada e saída do TPO durante a interrupção de tensão.

#### 6.4 Resposta em frequência do TPO

Determinar a resposta em frequência do transformador de potencial óptico é fundamental para validar até qual frequência de distúrbios ele é capaz de medir, além das variações de tensão de curta duração. Para levantar essa resposta, o transformador foi ensaiado com 4 kV<sub>RMS</sub> em sua entrada, sem a presença de distúrbios, e verificada sua saída para diferentes frequências.

A saída do transformador para entrada de 60 Hz, 100 Hz, 200 Hz, 400 Hz, 500 Hz e 1 kHz é mostrada na Figura 6.28.



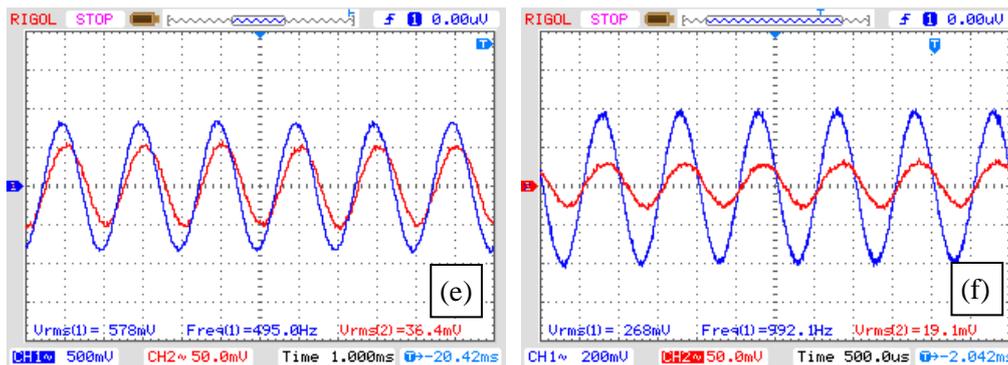


Figura 6.28 – Tensão de entrada do TPO (CH1) e tensão de saída do TPO (CH2) para frequência de entrada de (a) 60 Hz, (b) 100 Hz, (c) 200 Hz, (d) 400 Hz, (e) 500 Hz, (f) 1 kHz.

Pela análise da Figura 6.28 é possível observar que, conforme a frequência de entrada aumenta, a tensão de entrada do TPO diminui. Isso se deve ao fato de o *setup* experimental montado possuir um transformador de instrumentação elevador, responsável por aumentar a tensão até  $4 \text{ kV}_{\text{RMS}}$  na entrada do TPO. Esse transformador é fabricado para trabalhar com frequência nominal de 60 Hz e sua impedância equivalente é composta por indutância e uma resistência, funcionando como um filtro passa-baixa, de forma que sua resposta às frequências acima de sua frequência de corte é atenuada.

Quando a frequência está em 1 kHz, a tensão de saída do transformador elevador cai para  $536 \text{ V}_{\text{RMS}}$  quando deveria ser  $4 \text{ kV}_{\text{RMS}}$ . Dessa forma, não foi possível avaliar o comportamento do TPO para frequências maiores do que 1 kHz. A frequência de corte teórica está limitada a frequência de ressonância das cerâmicas piezoelétricas utilizadas na estrutura do transformador óptico. Para cerâmica do tipo SP-4, esse valor é igual a 186,09 kHz, segundo dados do fabricante Sparkler Ceramics.

Uma segunda abordagem para avaliar o comportamento do TPO em altas frequências foi realizada simulando uma função degrau no gerador de sinais. O degrau gerado foi amplificado e direcionado ao transformador elevador.

A Figura 6.29 (a) mostra o sinal de saída do gerador de funções/entrada do amplificador e o sinal de saída do amplificador. Já a Figura 6.29 (b) mostra a tensão de entrada e saída do transformador óptico.

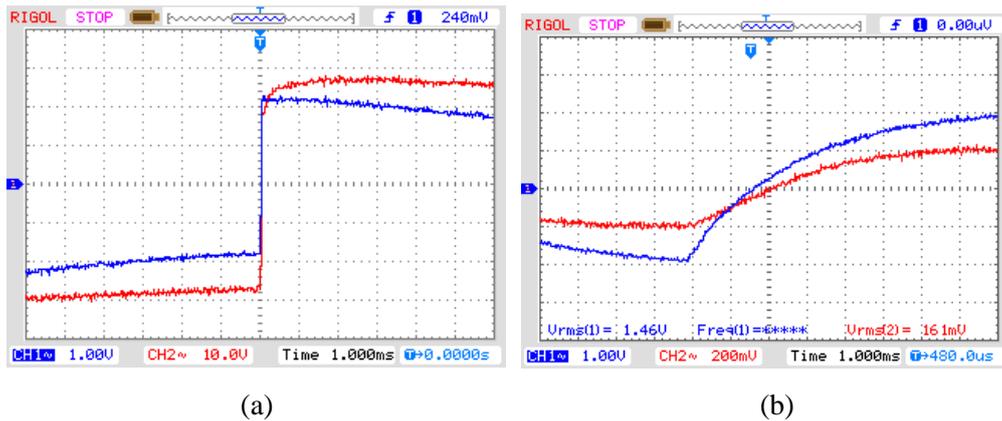


Figura 6.29 – (a) Tensão de saída gerador (CH1) e tensão de saída do amplificador (CH2),  
 (b) Tensão de entrada do TPO (CH1) e tensão de saída do TPO (CH2).

Pela análise da Figura 6.29 (b), vemos que o transformador elevador suprimiu o degrau amplificado, transformando-o em um exponencial ascendente atenuada e o transformador óptico respondeu com um sinal semelhante.

Como não foi possível obter um degrau na entrada do TPO para fazer sua resposta ao degrau, uma terceira abordagem foi aplicada para saber quais frequências podem ser transmitidas pelo transformador óptico. Ao calcular a FFT de um sinal de entrada aplicado ao TPO e compará-la com a FFT de sua resposta correspondente, é possível comparar a amplitude para cada par de frequência (entrada e saída) e verificar quando a atenuação atinge a frequência de corte de -3 dB.

A Figura 6.30 mostra a FFT para frequências de até 2,5 kHz, utilizando a tensão de entrada e saída do TPO da Figura 6.29 (b). Como as FFTs possuem amplitudes muito próximas, a Figura 6.31 mostra uma parte ampliada das FFTs sobrepostas para revelar as pequenas diferenças. É possível perceber que em algumas frequências a resposta do TPO atenua levemente o sinal de entrada e em outras frequências ocorre o contrário.

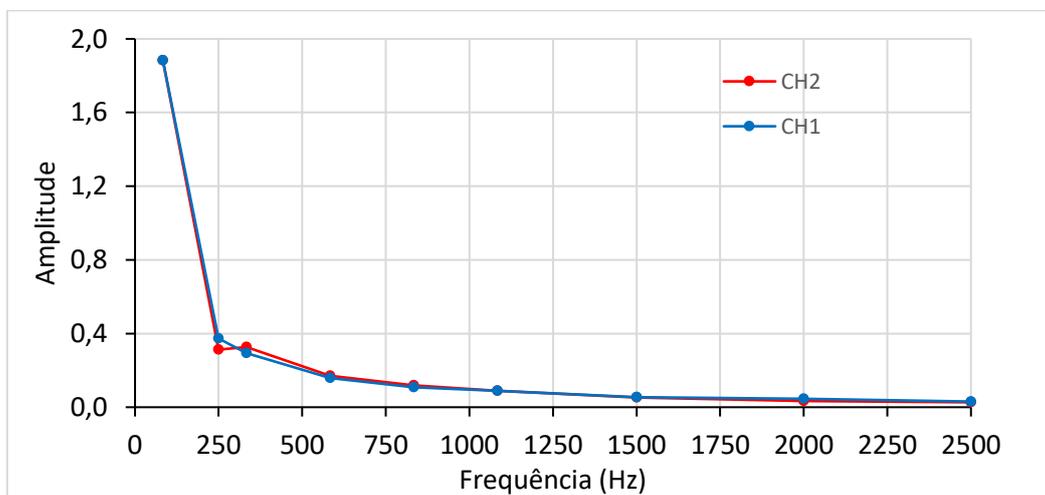


Figura 6.30 – FFT da entrada e saída do TPO para resposta ao degrau.

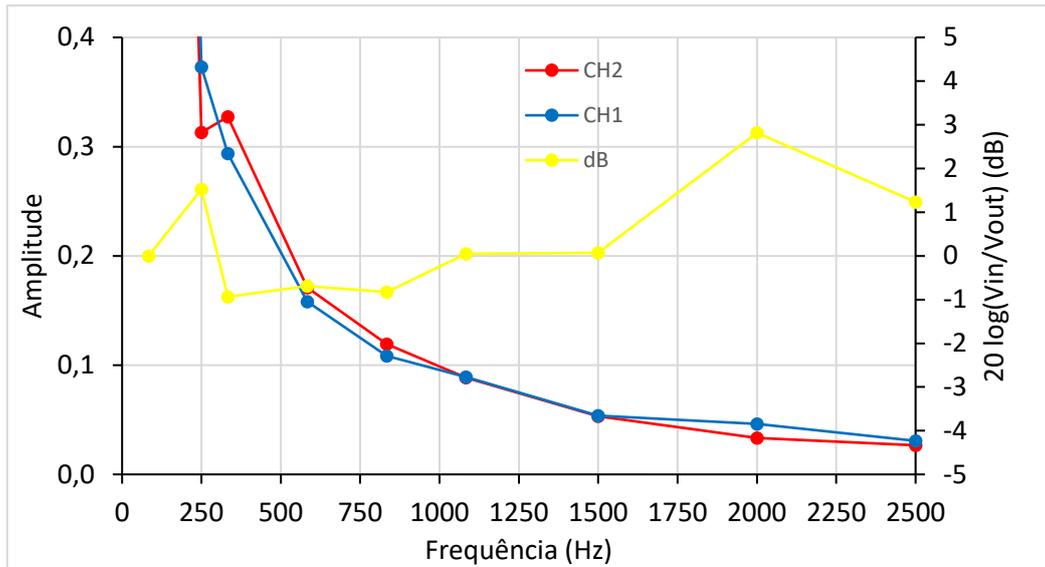


Figura 6.31 – Parte ampliada da FFT da entrada e saída do TPO para resposta ao degrau.

A Figura 6.31 também mostra a resposta do TPO em decibéis (dB). Em todas as frequências até 2,5 kHz, a resposta não atinge o ponto -3 dB, o que significa que a frequência de corte fica acima de 2,5 kHz. A conclusão é que, embora a frequência de corte não tenha sido detectável, o TPO é capaz de reproduzir pelo menos até o 41º harmônico.

Como o TPO foi capaz de reproduzir até 2,5 kHz, é possível concluir que ele também é capaz de reproduzir um transiente impulsivo de 400  $\mu$ s e um transiente oscilatório de baixa frequência, segundo a norma IEEE 1159 (Tabela 2.2).

## 7 CONCLUSÃO

O presente trabalho apresenta o projeto e ensaio de um transformador de potencial óptico para medidas de qualidade de energia. O transformador óptico projetado utiliza cerâmicas piezoelétricas como transdutor de tensão e redes de Bragg como elemento sensor.

Para realizar as medidas dos distúrbios de tensão, sem comprometer a acurácia e repetibilidade do transformador, uma técnica de compensação de temperatura utilizando apenas uma FBG foi proposta. Essa técnica se aproveita do coeficiente de dilatação térmica dos materiais onde a rede de Bragg deve ser fixada. Poucos trabalhos na literatura têm explorado esse método passivo em sensores de tensão baseados em FBG-PZT.

A fixação da FBG entre dois parafusos, capazes de transferir o deslocamento das cerâmicas PZT para a rede, facilita a adoção desse método de compensação. Pela primeira vez, um conjunto de parafusos posicionados para fora da pilha de cerâmicas foi projetado e testado, comprovando que seus materiais conseguem compensar o sistema termicamente. Nessa configuração, os parafusos são dispostos de forma que um deslize dentro do outro, enquanto a FBG é fixada em suas extremidades.

Para validar a metodologia de compensação de temperatura, o transformador óptico foi ensaiado em um banho termostático controlado, onde foi possível elevar a temperatura aplicada no conjunto. O resultado do experimento mostra que o comprimento de onda de Bragg permaneceu constante durante o aumento da temperatura, comprovando que os materiais escolhidos para compor a estrutura do TPO são capazes de compensar o aumento do comprimento de onda devido à temperatura.

Considerando o sistema termicamente compensado, o transformador foi primeiramente testado em uma tensão de entrada CA de  $4 \text{ kV}_{\text{RMS}}$  sem distúrbios e em seguida sob um afundamento instantâneo de tensão. Nesses ensaios, o comprimento de onda de Bragg foi monitorado através de um interrogador comercial com precisão de 10 pm, comprometendo a precisão das medidas. Por isso, apesar das variações do comprimento de onda terem reproduzido o afundamento de tensão aplicado no TPO, a queda foi maior do que a esperada.

Para melhorar a precisão dos resultados, um sistema de demodulação utilizando um filtro óptico sintonizável do tipo Fabry-Perot foi montado. O sinal de saída é a convolução do espectro de reflexão da FBG sensora com o espectro do filtro sintonizável. A convolução dos dois espectros foi direcionada a um fotodetector com amplificador

acoplado e o sinal de saída foi visualizado no mesmo osciloscópio utilizado para medir a tensão de entrada do transformador óptico.

O transformador óptico foi ensaiado sob três tipos de distúrbios apresentados na norma IEEE 1159: afundamentos e elevações instantâneas e interrupções momentâneas. O foco dos testes experimentais foram as variações de tensão de curta duração, por serem os distúrbios mais comuns em linhas de média tensão. Os resultados obtidos demonstram que o TPO consegue reproduzir os distúrbios aplicados em sua entrada com erro relativo menor que 5% e introduzindo um THD menor que 2%.

Além disso, concluiu-se que o transformador de potencial óptico proposto foi capaz de reproduzir até o 41º harmônico sem distorção significativa e surtos impulsivos de até 2,5 kHz, aumentando o número de distúrbios de qualidade de energia que o TPO é capaz de medir.

## 7.1 Trabalhos futuros

O transformador óptico apresentado nesse trabalho foi testado sob tensões de entrada de até 4 kV<sub>RMS</sub>, pois é a máxima tensão suportada da pilha de PZTs. Para ser instalado em campo, a fim de detectar distúrbios localizados em linhas de distribuição de 13,8 kV, deve-se empregar um divisor capacitivo de potencial (DCP).

Os DCPs são largamente utilizados em linhas de alta e média tensão para diminuir a tensão para os níveis aceitáveis aos transformadores de instrumentação. No caso do TPO projetado, como as cerâmicas são capacitivas, para fazer um divisor capacitivo basta adicionar um segundo capacitor para dividir a tensão de entrada de 13,8 kV<sub>fase-fase</sub> (equivalente a 8 kV<sub>fase-terra</sub>) para os 4 kV suportados pela pilha de PZTs.

Para criar esse capacitor de alta tensão, pode-se conectar vários capacitores nominais de 400 V em série, conforme mostra a Figura 7.1 (esquerda). Em seguida, o conjunto deve ser alojado dentro de uma bucha de 13,8 kV, enquanto o TPO é protegido dentro de uma caixa com classificação IP65, conforme mostrado na ilustração da Figura 7.1 (direita).

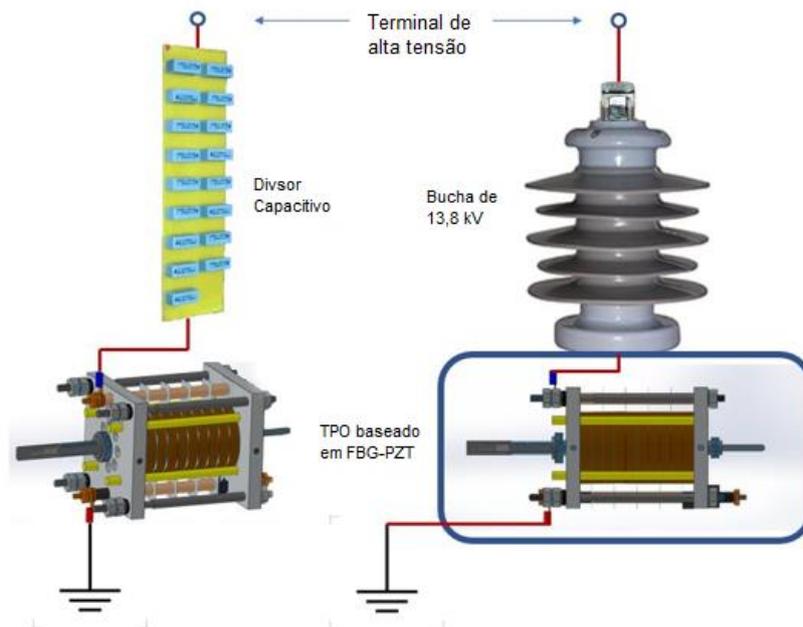


Figura 7.1 – Proposta de aplicação do TPO em campo com divisor capacitivo.

Como proposta de trabalho futuro, deve-se ensaiar o transformador sob diferentes distúrbios de qualidade de energia a partir de uma tensão de entrada de 13,8 kV com o uso do divisor capacitivo da Figura 7.1.

Também é importante ensaiar o transformador sob uma gama maior de distúrbios, além das variações de tensão de curta duração, que foram o escopo desse trabalho. Transitórios impulsivos e oscilatórios podem ser empregados ao TPO, desde que não excedam a máxima frequência de trabalho do transformador, limitada pela frequência de ressonância das cerâmicas piezoelétricas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. IEC 61869-103: Instrument transformers – The use of instrument transformers for power quality measurement, 2012.
- [2] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. IEC 61869-1: Instrument Transformers – General Requirements, 2007.
- [3] RAHMATIAN, F., ORTEGA, A. “Applications of Optical Current and Voltage Sensors in High-Voltage Systems”, *2006 IEEE/PES Transmission & Distribution Conference and Exposition: Latin America*, pp. 1-4, Caracas, 2006.
- [4] WEINA, G., WENJIE, H. “Optical Current Transformer Accuracy Problems and Solutions”, *2010 Asia-Pacific Conference on Power Electronics and Design*, pp. 47-50, Wuhan, China, 2010.
- [5] XU, X., TANG, J., HE, L., ZHONG X. “Design of a Novel Optical Voltage Sensor for Ultra-High Voltage Application”, *2009 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference*, pp. 1-4, Wuhan, China, 2009.
- [6] ALLIL, R. C. S. B., WERNECK, M. M. “Optical high-voltage sensor based on fiber Bragg grating and PZT piezoelectric ceramics”, In: *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 60, n. 6, pp. 2118 - 2125, June 2011.
- [7] RIBEIRO, B. A., WERNECK, M. M., “FBG-PZT sensor system for high voltage measurements”, *2011 IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference*, pp. 1-6, Hangzhou, China, 2011.
- [8] GONÇALVES, M. N., *Transformador de Potencial Óptico Com Divisor Capacitivo para Linhas de Distribuição de 13,8 kV*. Dissertação de M.Sc., Programa de Engenharia Elétrica, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2015.
- [9] DANTE, A., *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., Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2016.
- [10] FUSIEK, G., NELSON, J., NIEWCZAS, P., HAVUNEN, J., SUOMALAINEN, E., HÄLLSTRÖM, J. “Optical voltage sensor for MV networks” *2017 IEEE SENSORS*, pp. 1-3, Glasgow, 2017.

- [11] YANG, Q., HE, Y., SUN, S., LUO, M., HAN, R. “An optical fiber Bragg grating and piezoelectric ceramic voltage sensor”, **Review of Scientific Instruments**, vol. 88, no. 10, Oct. 2017.
- [12] DANTE, A., BACURAU, R.M., CARVALHO, C.C., ALLIL, R.C.S.B., WERNECK, M.M., FERREIRA, E.C. “Optical high-voltage sensor based on fiber Bragg gratings and stacked piezoelectric actuators for a.c. measurements”, **Applied Optics**, vol.58, issue 30, pp. 8322–8330, 2019.
- [13] NAZARÉ, F. V. B., WERNECK, M. M. “Compact optomagnetic Bragg-grating-based current sensor for transmission lines”, **IEEE Sensors Journal**, vol. 15, no. 1, pp. 100-109, Jan. 2015.
- [14] NELSON, J. *et al.*, “Development and testing of optically-interrogated current sensors”, *2016 IEEE International Workshop on Applied Measurements for Power Systems (AMPS)*, pp. 1-5, Aachen, 2016.
- [15] LOPEZ, J.D., DANTE, A, CREMONEZI, A.O., BACURAU, R.M., CARVALHO, C.C., ALLIL, R.C., FERREIRA, E.C., WERNECK, M.M. “Fiber-Optic current sensor based on FBG and Terfenol-D with magnetic flux concentration for enhanced sensitivity and linearity”, **IEEE Sensors Journal**, vol. 20, n° 7, pp. 3572–3578, Abr. 2020.
- [16] AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST, Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica, revisão 10, 2018.
- [17] BRONZEADO, H. S., RAMOS, A. J., OLIVEIRA, J. C., ABREU, J. P. G., ARRUDA, A. A. C., BRANDÃO, A. C. “Uma Proposta de Nomenclatura Nacional de Termos e Definições Associados à Qualidade de Energia Elétrica”, *II SBQEE-Seminário Brasileiro da Qualidade da Energia Elétrica*, Itajubá, Nov. 1997.
- [18] PAULILO, G. “Conceitos gerais sobre qualidade da energia”, **Revista O Setor Elétrico**, ed. 84, p. 30-37, Jan. 2013.
- [19] INSTITUTO DE ENGENHEIROS ELETRICISTAS E ELETRÔNICOS. IEE 1159-2019 – IEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality, 2019.
- [20] HILL, K. O., MELTZ, G., “Fiber Bragg grating technology fundamentals and overview”, **Journal of Lightwave Technology**, vol. 15, n. 8, pp. 1263-1276, 1997.

- [21] OTHONOS, A., KALLI, K., “Fiber Bragg gratings: Fundamentals and Applications in Telecommunications and sensing”, **Artech House Publishers**, Boston, 1999.
- [22] VALENTE, L. C. G., SILVA, L. C. N., RIBEIRO, A. S., TRIQUES, A., REGAZZI, R. D., BRAGA, A. M. B., “Técnicas de leitura para sensores a rede de Bragg”, 6<sup>a</sup> *Conferência sobre Tecnologia de Equipamentos*, Salvador, 2002.
- [23] RIBEIRO, B. A., *Compensação de temperatura em um sensor óptico-elétrico para medidas de tensão em linhas de transmissão*. Tese de D.Sc., Programa de Engenharia Elétrica, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2015.
- [24] ATPC DO BRASIL, **Apostila 1 – História dos materiais piezoelétricos**. In: *Materiais e Dispositivos Piezoelétricos: Fundamentos e desenvolvimentos*. São Carlos, 2004.
- [25] PI CERAMICS, **Designing with Piezoelectric Transducers: Nanopositioning Fundamentals**, 2005. Disponível em: <<http://www.piceramic.com/info.html>>. Acesso em: 02 Fev. 2019.
- [26] SPARKLER PIEZOCERAMICS, **General Information**. Disponível em: <<https://www.sparklceramics.com/Piezoelectric-Basics.html>>. Acesso em: 02 Fev. 2019.
- [27] SPARKLER PIEZOCERAMICS, **Piezoelectric Properties**. Disponível em: < <http://www.sparklceramics.com/piezoelectricproperties.html>>. Acesso em: 02 Fev. 2019.
- [28] XIONG, L., JIANG, G., GUO, Y., KUANG, Y., LIU, H. “Investigation of the Temperature Compensation of FBGs Encapsulated with Different Methods and Subjected to Different Temperature Change Rates”, **Journal of Lightwave Technology**, 2018.
- [29] GARÇÃO, L. A. *et al.*, “Temperature compensation method for FBG-based current sensors for transmission lines”, *2018 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC)*, pp. 1-6, Houston, TX, 2018.
- [30] DANTE, A. BACURAU, R. M., SPLEGLER, A. W., FERREIRA, E. C., DIAS, J. A. S. “A Temperature-Independent Interrogation Technique for FBG Sensors Using Monolithic Multilayer Piezoelectric Actuators”, **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, vol. 65, n<sup>o</sup>. 11, pp. 2476-2484, Nov. 2016.

- [31] FLORIDIA, C., BORIN, F., ROSOLEM, J. B., NALLIN, F. E., BEZERRA, U. H., TUPIASSU, A. A. A. “Temperature independent electrical field optical grating based sensor for high voltage applications”, *2007 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference*, pp. 384-388, Brazil, 2007.
- [32] YOFFE, G. W. KRUG, P. A., OUELLETTE, F., THORNCRAFT, D. A. “Passive temperature-compensation package for optical fiber grating”, **Applied Optics**, vol.34, no.30, pp.6859-6861, Oct. 1995.
- [33] TSAI, H. H., JANG, W., YEH, F. “Central wavelength tunable mechanism for temperature compensated package of fiber Bragg gratings”, In: *IEEE Transactions on Advanced Packaging*, vol. 24, no. 1, pp. 86-90, Fev. 2001.
- [34] HSU, Y. S., WANG, L., LIU, W., CHIANG, Y. J. “Temperature compensation of optical fiber Bragg grating pressure sensor”, **IEEE Photonics Technology Letters**, vol. 18, no. 7, pp. 874-876, Abr. 2006.
- [35] FUSIEK, G., ORR, P., NIEWCZAS, P. “Temperature-independent high-speed distributed voltage measurement using intensimetric FBG interrogation”, *2015 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC) Proceedings*, pp. 1430-1433, Pisa, 2015.
- [36] Rosolem, J. B. *et al.* “Optical sensors technologies evolution applied for power quality monitoring in the medium-voltage” In: *Proc. SPIE 10654, Fiber Optic Sensors and Applications XV*, 1065404, Maio 2018.
- [37] NASIR, M., DYŚKO, A., NIEWCZAS, P., BOOTH, C., ORR, P., FUSIEK, G. “Development of power system differential protection based on optical current measurement”, *2013 48th International Universities' Power Engineering Conference (UPEC)*, pp. 1-4, Dublin, 2013.
- [38] THORLABS, **PDA10CS InGaAs Switchable Gain Detector User Guide**. Revisão C de Abril de 2014. Disponível em: < <https://www.thorlabs.com>>. Acesso em: 05 Set. 2020.
- [39] RAMALHO, F., **Os fundamentos da física: Volume 2 – Termologia, Óptica e Ondas**. 1ª edição, Editora Moderna, 2007.
- [40] MICRON OPTICS, **Optical Sensing Interrogator SM125**. Documento: sm125\_1207.e\_1207..4, 2009. Disponível em: < [www.micronoptics.com](http://www.micronoptics.com)>. Acesso em: 05 Set. 2020.

[41] MICRON OPTICS, **Hyperion Optical Sensing Instrument si155**. Documento: si1255\_rev2.\_02.15.19. Disponível em: < [www.micronoptics.com](http://www.micronoptics.com) >. Acesso em: 05 Set. 2020.