



SISTEMA DE INTERROGAÇÃO COM COMPENSAÇÃO DE
TEMPERATURA PARA SENSORES BASEADOS EM FBG UTILIZANDO UM
ATUADOR TERMOELÉTRICO

Gustavo Marques Mattos

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

Orientadores: Marcelo Martins Werneck

Alex Dante

Rio de Janeiro

Novembro de 2018

SISTEMA DE INTERROGAÇÃO COM COMPENSAÇÃO DE
TEMPERATURA PARA SENSORES BASEADOS EM FBG UTILIZANDO UM
ATUADOR TERMOELÉTRICO

Gustavo Marques Mattos

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

Examinada por:

Prof. Mariane Rembold Petraglia, PhD.

Dr. Alex Dante, D.Sc.

Prof. Maria Aparecida Gonçalves Martinez, PhD.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

NOVEMBRO DE 2018

Mattos, Gustavo Marques

Sistema de Interrogação com Compensação de Temperatura para Sensores Baseados em FBG Utilizando um Atuador Termoelétrico/Gustavo Marques Mattos. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2018.

XVIII, 68 p.: il.; 29, 7cm.

Orientadores: Marcelo Martins Werneck

Alex Dante

Dissertação (mestrado) – UFRJ/COPPE/Programa de Engenharia Elétrica, 2018.

Referências Bibliográficas: p. 55 – 59.

1. Redes de Bragg. 2. FBG. 3. Interrogação.
4. Optoeletrônica. 5. Peltier. 6. Compensação de Temperatura. 7. TEC. I. Werneck, Marcelo Martins *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Elétrica. III. Título.

*“A empatia é uma das únicas
capacidades que nos salva de
generalizarmos nossas verdades
pessoais em detrimento da
realidade que é fornecida pelo
outro.”*

Josie Conti

*“Amar talvez seja isso...
Descobrir o que o outro fala
mesmo quando ele não diz.”*

Padre Fábio de Melo

Agradecimentos

Primeiramente, eu gostaria de agradecer a Deus por mais um passo na caminhada da minha vida, por ter concluído esse Mestrado mesmo com todas as dificuldades que passei nos últimos 2, 3 anos. De certa forma, tenho que agradecer-lo por esses percalços porque é com eles que a gente se desenvolve e melhora.

Não menos importante, deixo aqui também o meu agradecimento à minha família, que sempre proporcionou condições para que eu seguisse adiante. Agradeço meus irmãos, Guilherme e Patrícia, pelo encorajamento em persistir mesmo diante dos problemas; agradeço à minha mãe Fátima por dar mais amor que lhe cabe no peito; à minha sobrinha Isadora, por ser a menina mais doce que existe e por sempre me alegrar ao chegar em casa depois de um dia cansativo. Deixo aqui, também, meu agradecimento especial ao meu falecido pai, Raimundo José, que infelizmente não pode estar aqui presente para testemunhar mais essa conquista da minha vida. Entretanto, sei que, onde estiver, está feliz por me ver realizado.

Gostaria de agradecer aos meus amigos, Pedro Cardoso Silveira e Roberto Wu Mok, pelo companheirismo, cumplicidade, amizade e brincadeiras que vivenciamos juntos, dentro e fora do LIF. Aos demais colegas, não posso deixar de agradecer pelos momentos vividos, pelas vezes em que recebi ajuda e fui aconselhado. Em especial, gostaria de agradecer ao meu orientador, Alex Dante, por ter me acompanhado nessa jornada, sempre ao meu lado tirando dúvidas, dando conselhos, indicando o melhor caminho e o melhor jeito de fazer as coisas, sem falar das conversas bastante produtivas que por vezes tínhamos. Recomendo altamente a orientação de Alex Dante para outros discentes. Agradeço, também, à professora Regina Allil por ter

desempenhado papel fundamental na concessão da minha bolsa e, posteriormente, da ajuda de custo.

No mais, agradeço a todos que de certa forma contribuíram para que eu chegasse até aqui.

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

SISTEMA DE INTERROGAÇÃO COM COMPENSAÇÃO DE
TEMPERATURA PARA SENSORES BASEADOS EM FBG UTILIZANDO UM
ATUADOR TERMOELÉTRICO

Gustavo Marques Mattos

Novembro/2018

Orientadores: Marcelo Martins Werneck

Alex Dante

Programa: Engenharia Elétrica

Apresenta-se o desenvolvimento de um sistema optoeletrônico de interrogação (SOI) em malha fechada para sensores à rede de Bragg (FBG) aplicado a medições de sinais AC. Ele é baseado na técnica de redes gêmeas, na qual uma FBG filtro modula uma FBG sensora. Um microcontrolador é empregado para realizar medições de reflexão das FBGs, e um controle de malha fechada é implementado em *firmware* para manter a FBG filtro rastreando a FBG sensora sob variações de temperatura, com um atuador termoelétrico (TEC). O SOI foi testado com um protótipo de sensor de alta tensão sob variação térmica de 29°C a 50°C e resultados experimentais mostraram que o sistema de interrogação é capaz de manter a FBG filtro rastreando a FBG sensora com um desvio máximo de 5×10^{-3} pm do ponto ótimo de operação, mesmo sob influência da temperatura. A análise do domínio de frequência dos sinais AC de saída mostrou que o SOI é capaz de realizar medições precisas no ponto de operação de menor distorção disponível. Além do mais, ele também pode ser adaptado para o monitoramento de vibrações, como na manutenção preditiva de motores e turbinas, e nas vibrações sísmicas.

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

A TEMPERATURE-COMPENSATED FBG SENSOR INTERROGATOR
BASED ON THERMOELECTRIC ACTUATOR

Gustavo Marques Mattos

November/2018

Advisors: Marcelo Martins Werneck

Alex Dante

Department: Electrical Engineering

It is presented the development of an optoelectronic interrogation system (OIS) in a closed-loop control for Fiber Bragg Grating (FBG) sensors applied to AC signal measurements. It is based on the twin grating technique, in which an FBG is modulating a sensing-FBG. A microcontroller is employed to perform reflection measurements of the FBGs, and a closed-loop control is implemented in firmware to keep the filter-FBG tracking the sensing-FBG under temperature variations, with a thermoelectric actuator (TEC). The OIS was tested with a high-voltage sensor prototype under the thermal variation of 29°C to 50°C and the experimental results showed that the interrogation system is capable of keeping the filter-FBG tracking the sensing-FBG with a maximum deviation of 5×10^{-3} pm from the optimum point even under the influence of temperature. An analysis of the frequency domain of the AC signals showed that the OIS is able to perform accurate measurements at the operating point of least distortion possible. In addition, it can also be adapted for the monitoring of vibrations, such as in the maintenance of engines and turbines, and in the seismic vibrations.

Sumário

Lista de Figuras	xi
Lista de Tabelas	xiii
Lista de Símbolos	xiv
Lista de Abreviaturas	xvii
1 Introdução	1
1.1 Contextualização e Motivação	1
1.2 Revisão do Estado da Arte	3
1.3 Objetivos	5
1.4 Estrutura da Dissertação	5
2 Fundamentos Teóricos	7
2.1 Introdução às Redes de Bragg em Fibras Ópticas	7
2.1.1 Redes de Bragg e Métodos de Fabricação	7
2.1.2 Comportamento da Luz em uma Fibra Óptica com FBG	8
2.1.3 Sensibilidade de FBGs à Temperatura e Deformação Mecânica	10
2.1.4 Técnicas de Interrogação de Redes de Bragg	13
2.2 Interrogação de Redes de Bragg pela Técnica de FBGs Gêmeas	16
2.3 Compensação de Temperatura em Sistemas de Interrogação com FBGs Gêmeas	18
2.4 Atuadores Piezoelétricos	21
2.5 Atuadores Termoelétricos	23

2.5.1	O Efeito Peltier	24
2.5.2	Resfriador Termoelétrico - TEC	24
2.6	Aspectos Teóricos de Controle Realimentado Clássico	25
3	O Sistema de Interrogação	27
3.1	Projeto do Sistema de Interrogação	27
3.2	Fonte de Luz	30
3.3	Compensação de Flutuações de Potência da Fonte de Luz	31
3.4	Eletrônica de Interrogação	33
3.4.1	Projeto da Eletrônica de Interrogação	34
3.4.2	<i>Firmware</i> Embarcado	37
3.5	Princípio de Operação do Sistema de Interrogação	38
4	Resultados e Discussões	41
4.1	Montagem em Bancada do <i>Setup</i> do Sistema de Interrogação	41
4.2	Implementação e Testes da Rotina Principal de Controle	42
4.3	Medidas de Tensão com Compensação de Temperatura	47
5	Conclusões e Trabalhos Futuros	52
5.1	Conclusões	52
5.2	Trabalhos Futuros	54
	Referências Bibliográficas	55
A	Artigo Submetido para Publicação	60

Lista de Figuras

2.1	Gráfico teórico representativo do IR do núcleo de uma fibra óptica com FBG, em relação ao seu comprimento	9
2.2	Representação de uma FBG em uma fibra óptica e espectros incidentes, de transmissão e de reflexão	9
2.3	Diagrama esquemático para interrogação em um OSA do espectro de reflexão da FBG	14
2.4	Diagrama esquemático para interrogação do espectro de reflexão da FBG com filtro Fabry-Perot	15
2.5	Diagrama esquemático para a interrogação do espectro de reflexão de uma FBG com sua gêmea	16
2.6	Perfis das FBGs gêmeas e de convolução calculado numericamente	18
2.7	Representação gráfica da convolução entre os espectros das FBGs gêmeas independente de variações de temperatura no sensor	20
2.8	Representação gráfica da obtenção do sinal AC de convolução em torno do ponto de rastreamento a partir do sinal do sensor	21
2.9	Cerâmica PZT utilizada nesta pesquisa	23
2.10	Resfriador termoelétrico	25
2.11	Diagrama de blocos dos componentes de um controle realimentado elementar	26
3.1	<i>Setup</i> óptico e eletrônico do sistema de interrogação proposto	29

3.2	FBG sensora colada no diâmetro interior de uma cerâmica PZT em forma de anel. Inset: FBG filtro colada na superfície de um substrato de alumínio	30
3.3	Espectro de emissão do ASE obtido experimentalmente no OSA	31
3.4	Fluxograma da sub-rotina de compensação de flutuações de potência da fonte de luz	32
3.5	Desenho esquemático do circuito amplificador de transimpedância da eletrônica de interrogação	34
3.6	Desenho esquemático do circuito do driver do TEC	35
3.7	Representação gráfica dos sinais lógicos PWM, CTL, RES e AQ	37
3.8	Fluxograma representativo das tarefas do microcontrolador definidas em <i>firmware</i>	39
4.1	Estrutura montada na sala de ensaios em alta tensão para implementação do protótipo de sensor e para acompanhamento do valor eficaz do sinal aplicado	42
4.2	<i>Setup</i> óptico montado em bancada do sistema de interrogação	43
4.3	Diagrama de blocos da malha de controle presente no sistema de interrogação proposto	43
4.4	Gráfico mostrando a variável controlada $p_{CONV}(t)$ alcançando o <i>set-point</i> $p_{SP}(t) = 2,0$ V, provando o correto funcionamento do controlador	44
4.5	Compensação de temperatura realizada pelo sistema de interrogação proposto	48
4.6	Sinal de tensão AC da rede elétrica e de sua FFT	49
4.7	Sinais de saída adquiridos pelo sistema de interrogação desenvolvido, sob três temperaturas diferentes medidas no ambiente de sensoramento e de suas FFTs	50

Lista de Tabelas

2.1	Parâmetros da equação que modela a sensibilidade da FBG com relação à temperatura e deformação mecânica, com suas respectivas descrições e valores	11
2.2	Valores de coeficiente de dilatação térmica de alguns metais	12
2.3	Especificações do TEC ET-031-10-20.	25
3.1	Tabela verdade para os sinais da lógica digital.	36

Lista de Símbolos

C	Capacitância, p. 36
E	Campo Elétrico, p. 22
I	Corrente Elétrica, p. 24
L	Indutância, p. 36
L_{PZT}	Espessura do Anel PZT, p. 45
Q	Calor, p. 24
S	Sensibilidade entre Tensão da Rede Elétrica e o Deslocamento do Espectro da FBG, p. 46
SP	Sinal de Referência da Malha de Controle, p. 25
T	Temperatura, p. 20
T_0	Temperatura no Instante Inicial, p. 19
T_f	Temperatura no Instante Final, p. 19
T_C	Temperatura de Curie, p. 22
ΔL_{FBG}	Varição do Comprimento da FBG, p. 45
ΔL_{PZT}	Varição da Espessura do Anel PZT, p. 45
ΔT	Varição de Temperatura, p. 11

$\Delta V_{DC CONV}$	Varição da Tensão Correspondente à Variação do Nível DC de Convolução dos Espectros das FBGs, p. 46
ΔV_{pp}^{AC}	Tensão de Pico-a-pico da Rede Elétrica, p. 45
$\Delta \epsilon$	Varição de Tensão Mecânica, p. 12
$\Delta \lambda_{B, pp}^{AC}$	Intervalo de Comprimento de Onda Correspondente à Tensão de Pico-a-pico da Rede Elétrica, p. 46
$\Delta \lambda$	Intervalo de Comprimento de Onda Genérico, p. 19
$\Delta \lambda_B$	Varição do Comprimento de Onda de Bragg, p. 11
$\Delta \lambda_{DC CONV}$	Varição do Comprimento de Onda Correspondente à Variação do Nível DC de Convolução dos Espectros das FBGs, p. 46
Δn	Varição do Índice de Refração do Núcleo da Fibra Óptica, p. 8
Δt	Intervalo de Tempo, p. 19
Δz	Comprimento da FBG, p. 8
Λ	Período das Grades de Bragg, p. 10
Π	Coefficiente de Peltier, p. 24
α	Coefficiente de Dilatação Térmica, p. 12
α_{FBG}	Coefficiente de Dilatação Térmica da Sílica, p. 11
ϵ	Tensão Mecânica, p. 22
ϵ_{FBG}	Tensão Mecânica Aplicada à FBG, p. 11
ϵ_{PZT}	Tensão Mecânica Proporcionada pelo Anel PZT, p. 45
η	Coefficiente Termo-óptico da Sílica Dopada com Germânio, p. 11

λ_B	Comprimento de Onda de Bragg, p. 9
ρ_e	Coefficiente Fotoelástico da Sílica, p. 11
d_{ij}	Constante Piezoelétrica, p. 22
e	Sinal de Erro da Malha de Controle, p. 25
f_R	Frequência de Ressonância, p. 36
n	Índice de Refração, p. 8
n_0	Índice de Refração Médio do Núcleo da Fibra Óptica, p. 8
n_1	Índice de Refração do Núcleo da Fibra Óptica, p. 8
n_2	Índice de Refração das Grades de Bragg, p. 8
n_{eff}	Índice de Refração Efetivo do Núcleo da Fibra Óptica, p. 10
t	Tempo, p. 19
t_0	Instante de Tempo Inicial, p. 19
t_f	Instante de Tempo Final, p. 19
u	Sinal de Controle da Malha de Controle, p. 25
y	Sinal da Variável Controlada da Malha de Controle, p. 25
y_m	Sinal da Variável Controlada Medida da Malha de Controle, p. 25
z	Distância Longitudinal no Eixo da Fibra Óptica, p. 8

Lista de Abreviaturas

AC	<i>Alternating Current</i> , p. 4
ADC	<i>Analog-to-Digital Converter</i> , p. 33
ASE	<i>Amplified Spontaneous Emission</i> , p. 9
DC	<i>Direct Current</i> , p. 19
EMI	<i>Electromagnetic Interference</i> , p. 3
FBG	<i>Fiber Bragg Grating</i> , p. 3
FET	<i>Field Effect Transistor</i> , p. 35
FFP-TF	<i>Fiber Fabry-Perot Tunable Filter</i> , p. 4
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i> , p. 5
IR	Índice de Refração, p. 8
MMPA	<i>Monolithic Multilayer Piezoelectric Actuator</i> , p. 4
OFS	<i>Optical Fiber Sensors</i> , p. 3
OIS	<i>Optoelectronic Interrogation System</i> , p. viii
OSA	<i>Optical Spectrum Analyzer</i> , p. 13
PCB	<i>Printed Circuit Board</i> , p. 42
PID	<i>Proportional-Integral-Derivative</i> , p. 39

PR	Ponto de Rastreamento, p. 20
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i> , p. 35
PZT	Titanato Zirconato de Chumbo, p. 4
RAM	<i>Random Access Memory</i> , p. 34
RMS	<i>Root Mean Square</i> , p. 46
SEATAC	Sala de Ensaaios de Alta Tensão e Alta Corrente, p. 41
SLED	<i>Superluminescent Diode</i> , p. 9
SNR	<i>Signal-to-Noise Ratio</i> , p. 31
SOI	Sistema Optoeletrônico de Interrogação, p. vii
TC	Transformador de Corrente, p. 1
TEC	<i>Thermoelectric Cooler</i> , p. 4
TEG	<i>Thermoelectric Generator</i> , p. 23
TOC	Transformador Óptico de Corrente, p. 2
TOP	Transformador Óptico de Potencial, p. 2
TP	Transformador de Potencial, p. 1
UV	Ultravioleta, p. 8

Capítulo 1

Introdução

Este capítulo apresenta a motivação para se fazer esta pesquisa, bem como sua colocação no cenário mundial e os objetivos a serem alcançados. Em seguida, um breve resumo da estrutura do texto desta dissertação é apresentado.

1.1 Contextualização e Motivação

A cada dia, o desenvolvimento das nações e de suas sociedades têm feito com que haja um aumento da demanda por energia elétrica bem como por desenvolvimento de tecnologias inerentes a ela e associadas ao pilar: geração, transmissão e distribuição. Nesse contexto, se torna fácil imaginar que em estações e subestações seja necessária a utilização de equipamentos de medição e monitoramento de variáveis (corrente e tensão, principalmente) importantes aos processos envolvidos diretamente com esse pilar. Muitas vezes, para acompanhar essa demanda por energia e para aprimorar sua infraestrutura, empresas do setor elétrico têm buscado inovar e adotar novas tecnologias que sejam mais adequadas.

Na parte de potência de sistemas elétricos, os equipamentos que são amplamente utilizados na instrumentação e no monitoramento das linhas de transmissão são os Transformadores para Instrumentos (TI), que se dividem em Transformadores de Potencial (TP) e Transformadores de Corrente (TC). São três as principais aplicações nas quais eles são utilizados: medição (para cobrança de energia e fins de transação);

proteção (de sistemas elétricos e para propósitos de retransmissão); e para fazer um levantamento analítico das cargas industriais sob o domínio da empresa, de modo que ela possa ter uma boa gestão econômica [1]. Portanto, os TIs são desenvolvidos para transformar a alta tensão ou corrente dos sistemas de transmissão e distribuição em valores baixos. Dessa forma, se torna possível utilizar dispositivos de medição dessas variáveis, pois estas foram adequadas a eles.

A tecnologia dos TPs e TCs é bastante consolidada mundialmente, fato este alavancado pela competitividade entre as empresas fabricantes. Embora isso represente um aspecto muito interessante sobre eles, esses transformadores apresentam algumas características negativas, dentre as quais se pode citar: problemas com relação à linearidade e à presença de harmônicas, podendo causar um superaquecimento, danificar conexões e cabos, ocasionar explosões além de poder saturar o núcleo ferromagnético dos TIs; e limitações em segurança e precisão.

Existe uma técnica que é uma alternativa à utilização dos TIs convencionais e é justamente o que motiva esta pesquisa. Trata-se da utilização de componentes ópticos que, quando associados a uma eletrônica e a dispositivos atuantes, funcionam como Transformadores Ópticos de Potencial (TOP) e Transformadores Ópticos de Corrente (TOC). Eles são mais vantajosos do que os tradicionais por serem mais leves, menores e imunes à interferência eletromagnética; comportam-se de forma passiva eletricamente, não precisando, necessariamente, de eletricidade no local da aplicação do sensor; apresentam maior sensibilidade nas medidas, assim como evitam a saturação de núcleo dos transformadores [2].

No Brasil, a utilização desses equipamentos ópticos ainda enfrenta dificuldade de implementação devido a não aceitação das novas tecnologias pelas empresas. Além disso, a integração deles com os sistemas atuais esbarra em alguns problemas técnicos que, por sua vez, precisam ser superados, assim como a barreira cultural, que impede que o interesse por TIs ópticos seja mais difundido e aceito no país, como foi discutido em [3].

1.2 Revisão do Estado da Arte

Sensores à fibra óptica (OFS) têm ocasionado um impacto enorme na instrumentação moderna e em sistemas de medição devido às excelentes propriedades das fibras ópticas tais como: imunidade à interferência eletromagnética (EMI), maleabilidade, peso leve, alto isolamento elétrico, compatibilidade química para operação numa grande variedade de ambientes perigosos e arriscados, e compatibilidade com sistemas de monitoramento em seres vivos [2, 4, 5].

Um tipo de OFS que tem se popularizado nas últimas décadas é a rede de Bragg em fibra óptica (FBG), que tem alguns milímetros de comprimento, são passivas e presentes no interior do núcleo da fibra sensora, que pode ser implementada como um *array* quase distribuído de sensores em um único cabo óptico, apresentando diversas vantagens sobre os sensores convencionais. Desde a sua descoberta em 1978 [6], as FBGs têm sido estudadas extensivamente e empregadas como sensores adequados para uma grande gama de parâmetros físicos, desde temperatura e deformação mecânica (*strain*) a campos elétricos e magnéticos, força, aceleração, pressão, nível e vibração [7, 8]. No setor de geração e distribuição de energia elétrica, por exemplo, existe um aumento no número de artigos científicos indicando a aplicação de FBGs no desenvolvimento de OFSs, particularmente para o monitoramento de parâmetros críticos de linhas de transmissão de alta tensão, como relatado em [9–19].

Para evitar erros em medidas devido ao efeito mútuo entre variação de temperatura e o estresse mecânico (que são intrínsecas às FBGs e serão detalhados adiante), um sistema de interrogação de um sensor baseado em FBG deve promover a separação da sensibilidade cruzada entre eles, como demonstrado em [12, 18, 20–22]. Em [13] os autores propuseram um sensor de corrente CA pequeno e leve, baseado em FBG para linhas de transmissão para medidas com compensação de temperatura. A FBG sensora foi colada em um material magnetostrictivo sensível a variações do campo magnético atuando sobre ele. Este sensor é capaz de recuperar toda a senóide de 60 Hz da rede elétrica. Os autores também descrevem os sistemas de interrogação utilizados para demodular o sinal do sensor: utilizando um filtro Fabry-Perot (FFP-

TF) e a técnica de redes gêmeas. Para a compensação de temperatura, os autores posicionam a FBG filtro juntamente à FBG sensora, de forma que ambas estejam submetidas à mesma variação térmica.

Em [16], é utilizada a técnica de interrogação de redes gêmeas, que apresenta um menor custo de implementação quando comparada a técnicas que utilizam o FFP-TF. Na pesquisa em questão, os autores usam uma FBG que filtra o sinal da FBG do sensor, sendo a que filtra colada em um material expansível para aumentar a sensibilidade da FBG. A compensação térmica é feita a partir da implementação de um controle em malha fechada fazendo-se valer de um sensor eletrônico de temperatura e um atuador termoelétrico (TEC). No entanto, utilizar um sensor eletrônico vai de encontro ao objetivo do sensoriamento com fibras ópticas. Pensando nisso, Ribeiro *et al.* [18] propõem a utilização de uma terceira FBG para medir temperatura, tornando possível alimentar a malha de controle com esses valores.

Em [23], a mesma técnica de Ribeiro foi implementada, mas sem a necessidade de um sensor de temperatura adicional. A malha fechada controla, dessa vez, o sinal de convolução entre as FBGs. Dante *et al.* [12] propuseram essa mesma técnica para a independência de variações de temperatura, porém, foi utilizado um atuador piezoelétrico monolítico de multi camadas (MMPA) para possibilitar o rastreamento da FBG filtro, embora um MMPA seja pouco disponível no mercado em comparação com um TEC.

Fusiek *et al.* [17] compensaram temperatura ao anexar cada metade de uma única FBG em dois materiais: um atuador piezoelétrico e, o outro, um invar como uma extensão de um eletrodo do atuador piezoelétrico de titanato zirconato de chumbo (PZT). Esse processo divide o espectro da FBG em dois picos, onde a posição relativa entre eles está associada a medidas AC sem influência de temperatura.

É nesse contexto que se insere este trabalho, onde foi projetado um sistema optoeletrônico de interrogação para sensores baseados em FBG de variáveis AC aplicados à medida de *strain* (ou outras variáveis físicas que induzam *strain* à FBG sensora), empregando a técnica de interrogação por redes gêmeas independente de

variações de temperatura. O sistema de interrogação desenvolvido foi testado em laboratório em medidas de alta tensão com variações de temperatura.

1.3 Objetivos

Dentre os objetivos deste trabalho, estão incluídos o projeto, construção e validação de um sistema optoeletrônico de interrogação de sinais AC provenientes de sensores baseados em FBG, empregando a técnica de interrogação por redes gêmeas com compensação de variações de temperatura no sensor através da utilização de um atuador termoelétrico para manter a FBG que filtra o sinal da FBG sensora, rastreando-a. Esse rastreamento deve ser feito através da implementação de um controle em malha fechada onde o nível de convolução entre os espectros das FBGs deve ser mantido em um nível ótimo e a atuação deve ser feita a partir de um TEC, onde é colada a FBG filtro, que é capaz de deslocar seu espectro com resolução sub-picométrica.

Esse sistema de interrogação desenvolvido deve ser capaz de ser implementado em uma linha de transmissão, em especial linhas de 13,8 kV, no intuito de, possivelmente no futuro, substituir os tradicionais TPs. Para isso, ele deve ser leve, de baixo custo e oferecer medidas precisas a respeito das variáveis sensoreadas. No caso de medições de alta tensão, o sistema de interrogação deve possibilitar a reconstrução do sinal da rede elétrica com uma distorção mínima. As análises das transformadas rápidas de Fourier (FFT) de cada senóide são cruciais para a avaliação da potencialidade deste sistema de interrogação.

1.4 Estrutura da Dissertação

Esta dissertação está estruturada em cinco capítulos. O presente Capítulo contextualiza o leitor a respeito dos transformadores para instrumentos divididos em transformadores de potencial e transformadores de corrente, que podem ser substituídos por transformadores ópticos, apresentando e discutindo no texto as melhorias que eles podem trazer. Ainda neste capítulo, é feita a revisão do estado da arte,

onde se retrata, descreve e caracteriza os recentes trabalhos realizados neste tema, evidenciando, portanto, suas vantagens e desvantagens.

No Capítulo 2, é apresentada toda a fundamentação teórica em que esta pesquisa é baseada, ressaltando as teorias de FBG, apresentando as diferentes técnicas de interrogação conhecidas, dando um enfoque especial na técnica de interrogação por FBGs gêmeas. Além disso, são discutidas também as teorias que envolvem os atuadores piezoelétricos e termoeletrônicos, que são utilizados neste trabalho. Ao final do capítulo, uma breve teoria sobre controle realimentado clássico é apresentada.

O Capítulo 3 descreve o sistema de interrogação desenvolvido em laboratório, incluindo os elementos que o compõem: fonte de luz, FBGs, circulador e acoplador óptico, protótipo de sensor, atuador, a eletrônica de aquisição de sinais ópticos e a eletrônica de potência. O *firmware* gravado no microcontrolador, presente na eletrônica de aquisição de sinais, também é descrito sendo apresentadas suas rotinas e funções. Por fim, o princípio de funcionamento do sistema de interrogação desenvolvido é apresentado.

No Capítulo 4, são apresentados os resultados provenientes dos experimentos de validação do sistema de interrogação como um todo, com a utilização do protótipo do sensor. Partes do *setup* óptico montado foram avaliadas individualmente, possibilitando identificar o funcionamento de cada uma delas através de gráficos. Em seguida, no Capítulo 5, é feita uma conclusão sobre esta pesquisa, são discutidos alguns aspectos sobre a implementação do sistema de interrogação em questão e são apresentadas algumas sugestões de trabalhos futuros e melhorias.

Capítulo 2

Fundamentos Teóricos

Este capítulo apresenta a teoria envolvida no desenvolvimento deste trabalho. Abordam-se conceitos de Grades de Bragg em fibra óptica, explica-se o funcionamento de atuadores térmicos (em especial, células termoelétricas) e piezoelétricos, além de serem discutidos alguns aspectos de sistemas de controle. São apresentados os fundamentos mais relevantes, de forma que o leitor possa entender melhor o que será abordado nos capítulos subsequentes.

2.1 Introdução às Redes de Bragg em Fibras Ópticas

O físico William Lawrence Bragg, nascido em 1890, descobriu a lei de difração de raios-X, fato este que o levou a receber o Prêmio Nobel de Física em 1915. Este conceito foi desenvolvido e se tornou importante para que, após a descoberta da fotossensibilidade de fibras ópticas em 1978 por Ken Hill [6], fosse possível surgirem tecnologias para o projeto de sensores baseados na lei de difração.

2.1.1 Redes de Bragg e Métodos de Fabricação

As FBGs são alterações feitas em uma pequena extensão da fibra óptica virgem em que, através da exposição de seu núcleo a um padrão de interferência de radiação

ultravioleta (UV), gera-se uma modulação periódica de seu índice de refração (IR). No advento desta tecnologia em 1978, sua confecção se dava por uma técnica de gravação interna, em que a radiação UV é emitida pelo núcleo da fibra. Existem também técnicas de gravação externas, divididas entre a interferométrica e o método da máscara de fase. Na técnica interferométrica, um feixe de luz de um laser é dividido em dois, por um prisma. Cada feixe é direcionado através de espelhos a um mesmo trecho da fibra para, assim, criar nela o padrão. Na técnica da máscara de fase, que é um elemento óptico transparente à radiação UV, quando um feixe de luz de um laser incide sobre o núcleo, ele é dividido em diversas ordens de difração. Quando duas dessas ordens se cruzam, criam o padrão de interferência.

2.1.2 Comportamento da Luz em uma Fibra Óptica com FBG

A reflexão em uma FBG ocorre devido ao padrão de interferências criado na fibra, na qual cada uma de suas grades reflete uma parcela da luz que nelas incide. Na prática, esse padrão diz respeito a diferentes valores de IR que o núcleo passa a apresentar, após a gravação. Considerando uma FBG uniforme cujo núcleo possui um índice de refração médio n_0 entre os IRs do núcleo virgem da fibra óptica, n_1 , e das grades de Bragg, n_2 , no comprimento Δz da FBG, a modulação desse parâmetro n na fibra pode ser expressa por [24, 25]:

$$n(z) = n_0 + \Delta n \cos\left(\frac{2\pi z}{\Lambda}\right) \quad (2.1)$$

na qual $\Delta n = n_2 - n_1$ é a amplitude do IR, ou seja, sua variação na fibra, e z é a distância longitudinal em seu eixo. A Figura 2.1 exhibe a representação gráfica desta equação.

A Figura 2.2 ilustra o corte longitudinal de uma fibra óptica de sílica com uma FBG gravada em seu núcleo. Além disso, pode ser observada a representação de espectros típicos de luz que a atravessam. O espectro da luz que entra na fibra é largo

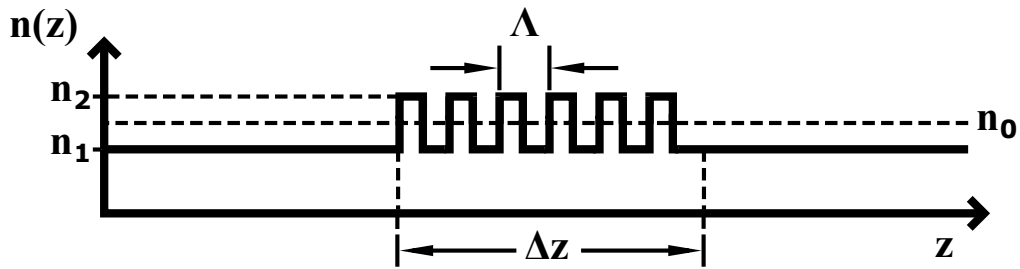


Figura 2.1: Gráfico teórico representativo do IR do núcleo de uma fibra óptica com FBG, em relação ao seu comprimento.

e deve, idealmente, apresentar valores iguais e suficientes de potência para a faixa de frequência que abrange. No entanto, as fontes de luz comumente utilizadas nessa aplicação, o Diodo Superluminescente (SLED) e a fonte de Emissão Espontânea Amplificada (ASE) não são ideais. Por esse motivo, o espectro da luz incidente representado na referida figura apresenta formato parabólico.

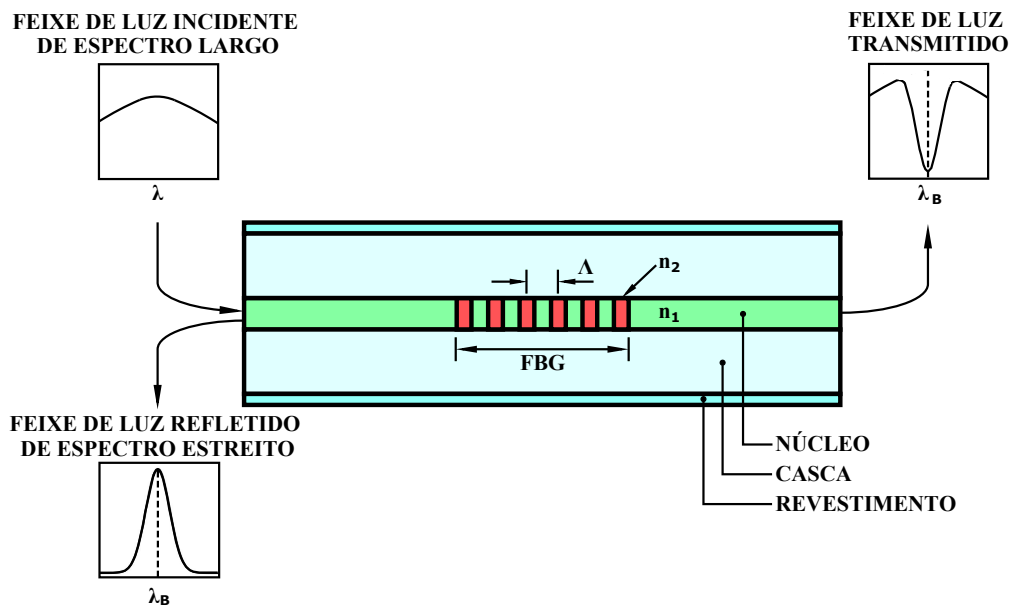


Figura 2.2: Representação de uma FBG em uma fibra óptica e espectros incidente, de transmissão e de reflexão.

Após entrar na fibra, a luz alcança a FBG e parte dela é refletida de volta para onde entrou. O espectro de reflexão tem como característica o fato de ser estreito, ou seja, toda sua potência é concentrada num intervalo curto do domínio da frequência. Sua representação gráfica assemelha-se a uma curva gaussiana, onde o comprimento de onda correspondente de seu pico representa o comprimento de onda de Bragg (λ_B), que é uma característica específica de cada FBG. A reflexão ocorre quando é

satisfeita a condição de Bragg, dada por [24, 25]:

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda \quad (2.2)$$

na qual n_{eff} é o índice de refração efetivo do modo de propagação do núcleo da fibra e Λ representa o período das grades de Bragg, que nada mais é que a distância entre elas, conforme pode ser visto na Figura 2.2. Dessa forma, uma variação em n_{eff} ou em Λ implica, necessariamente, uma variação em λ_B .

Uma vez que parte da luz é refletida dentro da fibra, a outra parte, naturalmente, segue o caminho direto pelo núcleo. Também representado na Figura 2.2, o espectro da luz transmitida é largo da mesma forma que o incidente. Porém, ele é reduzido em potência no mesmo intervalo em que se encontra o perfil da FBG, que foi refletido.

2.1.3 Sensibilidade de FBGs à Temperatura e Deformação Mecânica

A temperatura e deformação mecânica a que a fibra está submetida são fatores que influenciam diretamente no índice de refração efetivo e no período das grades. Eles fazem com que as FBGs sejam sensores bastante atrativos, já que variações de temperatura ou *strain* são codificadas somente na variação de unidades de comprimento de onda, não importando, a priori, possíveis flutuações de potência da fonte de luz [26].

A Equação a seguir modela a sensibilidade da FBG com relação a essas variáveis [24]:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - \rho_e) \epsilon_{FBG} + (\alpha_{FBG} + \eta) \Delta T \quad (2.3)$$

A descrição e os valores das variáveis envolvidas nesta equação são os que seguem na Tabela 2.1. Parâmetros sem quantificação são aqueles que não são constantes e dependem das condições a que o sistema que os compõe esteja submetido. Aqueles que se fazem presentes na Equação (2.3) e não estão citados na tabela, já foram

descritos no texto.

Tabela 2.1: Parâmetros da equação que modela a sensibilidade da FBG com relação à temperatura e deformação mecânica, com suas respectivas descrições e valores.

PARÂMETRO	DESCRIÇÃO	VALOR
$\Delta\lambda_B$	Varição do Comprimento de Onda de Bragg	–
ρ_e	Coefficiente Fotoelástico da Sílica	0,22
ϵ_{FBG}	Tensão Mecânica Aplicada à FBG	–
α_{FBG}	Coefficiente de Dilatação Térmica da Sílica	$0,55 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$
η	Coefficiente Termo-óptico da Sílica Dopada com Germânio	$8,60 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$
ΔT	Varição de Temperatura na FBG	–

Observando a Equação (2.3) fica claro que, variações na temperatura da FBG e havendo um estresse mecânico nela, o comprimento de onda de Bragg vai variar. A sensibilidade à temperatura se dá pelo fato de que, quando aquecida ou resfriada, a fibra óptica se dilata ou se contrai em todas as direções, em especial no eixo longitudinal da fibra, alterando o período das grades de Bragg. Da mesma forma, Λ pode variar quando a fibra está sob estresse mecânico. Ao esticá-la, por exemplo, as grades de Bragg ficam mais distantes entre si, alterando o comprimento de onda do espectro do feixe de luz refletido pela FBG, que é diretamente proporcional ao período das grades, conforme a Equação (2.2) e, portanto, influenciado pela mudança no valor de Λ .

Sendo assim, substituindo os valores da Tabela 2.1 na Equação (2.3) e considerando uma FBG solta gravada em uma fibra de forma que seu λ_B seja centrado em 1550 nm, a sensibilidade da FBG à temperatura, onde $\epsilon_{FBG} = 0$, é [25, 27]:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\Delta T} \simeq 14,20 \text{ pm } ^\circ\text{C}^{-1} \quad (2.4)$$

Para a mesma FBG, sua sensibilidade em relação ao estresse mecânico aplicado, onde $\Delta T = 0$, é [25, 27]:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\Delta\epsilon} \simeq 1,20 \text{ pm } \mu\epsilon^{-1} \quad (2.5)$$

Estes valores demonstram que, para o caso da sensibilidade à temperatura, para cada grau Celsius que varie na FBG, seu comprimento de onda de Bragg desloca 14,20 pm. Dessa forma, uma variação de 100 °C faz com que λ_B se altere em 1420 pm. Na prática, para a maioria das aplicações, esse valor de sensibilidade é muito pequeno. Seria desejável que fosse cerca de três ou quatro vezes o informado pela Equação (2.4), de modo que se obtivesse uma melhor resolução em aplicações de medida de temperatura.

Existem algumas técnicas que visam aumentar a sensibilidade da FBG à temperatura e *strain*. Dentre elas, encontra-se a que utiliza a expansão térmica de um determinado metal para causar um estresse mecânico à FBG que nele está colada. Nessa técnica, a sensibilidade da FBG à temperatura fica sujeita à dilatação do metal utilizado. Para selecionar qual metal empregar nessa configuração, é necessário, primeiramente, conhecer valores de coeficiente de dilatação linear de alguns metais. A Tabela 2.2 mostra esses valores para os mais comuns.

Tabela 2.2: Valores de coeficiente de dilatação térmica de alguns metais.

METAL	COEFICIENTE DE DILATAÇÃO TÉRMICA α ($10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$)
Chumbo (Pb)	27
Zinco (Zn)	26
Alumínio (Al)	22
Prata (Ag)	19
Cobre (Cu)	17
Ouro (Au)	15
Ferro (Fe)	12
Platina (Pt)	9

O alumínio é um metal facilmente encontrado e, ao mesmo tempo, apresenta

um coeficiente de dilatação térmica α_{Al} satisfatório para esta finalidade. Utiliza-se a Equação (2.3) e os valores da Tabela 2.1 para que seja calculada, então, a sensibilidade da FBG colada no alumínio. Neste caso, α_{FBG} será substituído por $\alpha_{Al} = 22 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, a tensão mecânica aplicada continua sendo $\epsilon_{FBG} = 0$, e é considerada uma FBG centrada em 1550 nm. Sendo assim, a sensibilidade passa a valer:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\Delta T} \simeq 47,40 \text{ pm } ^\circ\text{C}^{-1} \quad (2.6)$$

alcançando um valor superior a três vezes o relacionado à FBG solta. Portanto, para uma variação de temperatura $\Delta T = 100 \text{ }^\circ\text{C}$, o valor de $\Delta\lambda_B = 1,42 \text{ nm}$ que era considerado pequeno agora vale, satisfatoriamente, $\Delta\lambda_B = 4,74 \text{ nm}$.

2.1.4 Técnicas de Interrogação de Redes de Bragg

Um dos maiores desafios quando se trata de FBGs diz respeito a técnicas de modulação para interrogar seu sinal. Diferentes fatores devem ser levados em consideração na escolha da técnica de interrogação, onde o fundamental é a aplicação. A resolução, o tempo de resposta, o custo e a acurácia são alguns outros fatores capazes de influenciar nessa escolha.

No estudo da teoria das FBGs verifica-se, portanto, que ela é sensível a variações de temperatura e deformação mecânica. Essas variáveis estão diretamente relacionadas a valores de variação de comprimento de onda, no caso, o de Bragg (λ_B). Por outro lado, em algumas aplicações, é necessário, de fato, conhecer a potência óptica dos espectros de luz envolvidos e levá-los em conta em alguns experimentos. Sendo assim, se torna interessante obter o gráfico *Potência* \times *Comprimento de Onda* dos referidos espectros.

Existem equipamentos comerciais que fazem a leitura do espectro de luz que sai por uma fibra óptica. Em primeiro lugar pode ser citado o Analisador de Espectro Óptico (OSA). Esse equipamento desenha, em uma tela que compõe sua estrutura, o gráfico do espectro da luz que se deseja analisar. A Figura 2.3 mostra um diagrama

esquemático que deve ser montado a fim de fornecer ao OSA o espectro da luz refletida pela FBG. O ASE (ou SLED) emite luz de espectro largo, que percorre o caminho *i* pela fibra até alcançar a porta 1 do circulador óptico. Pela porta 2 ela sai, fazendo o caminho *ii* e, assim, alcança a FBG. A luz que é refletida por ela chega de volta à porta 2 do circulador através do caminho *iii* e, em seguida, sai pela porta 3 percorrendo o caminho *iv* até o OSA.

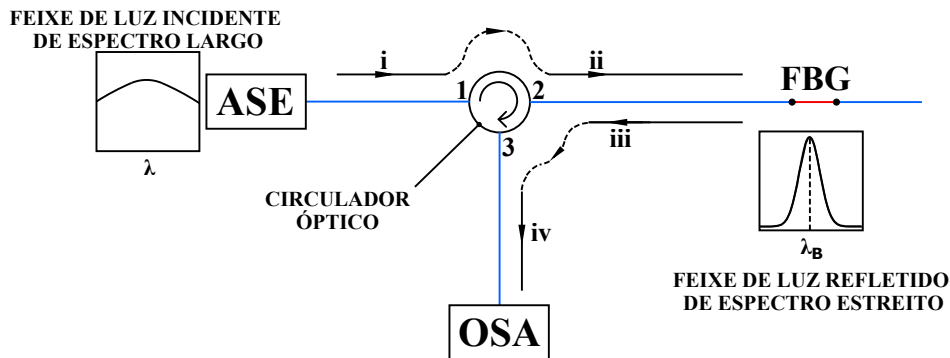


Figura 2.3: Diagrama esquemático para interrogação em um OSA do espectro de reflexão da FBG.

Essa técnica de interrogação é muito simples, no entanto, é muito cara porque os equipamentos utilizados apresentam um custo muito elevado [28]. Além disso, como destacam NUNES *et al.* [29], o OSA apresenta um tempo de resposta muito grande, demorando para atualizar em sua tela o espectro que está sendo analisado. Um outro ponto negativo a respeito desse método de interrogação está relacionado ao fato de um OSA não possuir uma resolução suficiente para detectar variações no comprimento de onda menores que 20 pm, dependendo do equipamento.

Uma outra técnica de interrogação se baseia na utilização de filtros sintonizáveis chamados de filtro Fabry-Perot. Ele é um equipamento óptico que possui um espectro característico de transmitância que pode ser sintonizado, e que tem como objetivo transmitir parte da luz que nele incide. A Figura 2.4 mostra um diagrama esquemático para a interrogação do sinal da FBG com um FFP-TF.

Analogamente ao que foi explicado sobre a Figura 2.3, a luz que se encontra no caminho *iv*, dessa vez é filtrada por um FFP-TF devidamente sintonizado. A porção de luz transmitida pelo filtro é dada pela convolução (intersecção) do sinal da

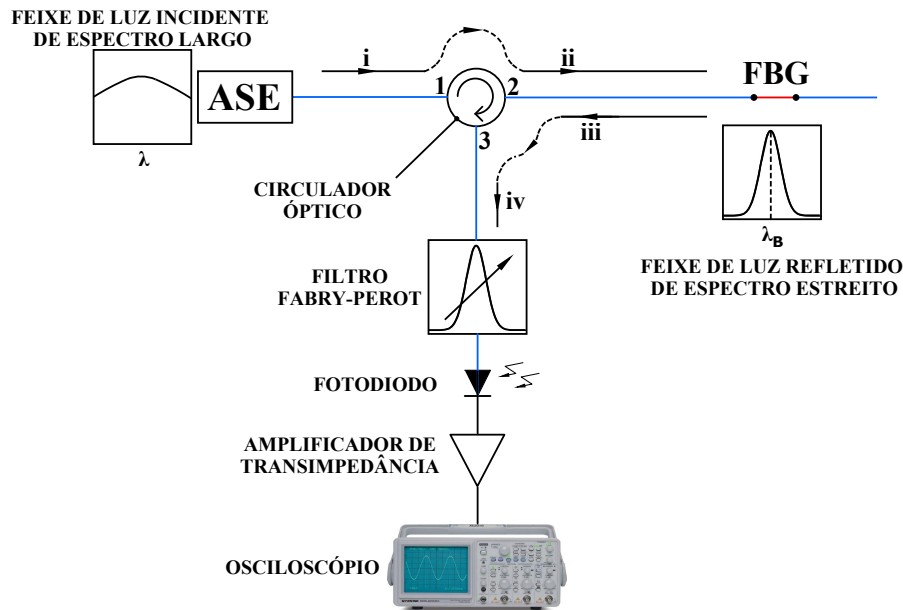


Figura 2.4: Diagrama esquemático para interrogação do espectro de reflexão da FBG com filtro Fabry-Perot.

luz incidida que foi refletida pela FBG com o espectro de transmitância do próprio FFP-TF. Em sua saída se encontra um fotodiodo que faz a conversão desse sinal de potência óptica transmitido em um nível de sinal elétrico, podendo, em seguida, ser visualizado em um osciloscópio ou em um computador, após ser amplificado. Uma outra possibilidade é conectar a saída do filtro Fabry-Perot ao OSA para que seja possível analisar o gráfico do espectro desejado.

Essa tecnologia de demodulação já é bastante consolidada e possui uma boa resolução e precisão em seus resultados, apesar de que ainda apresenta um custo significativamente elevado.

Essas duas formas de demodular o sinal da FBG são as mais utilizadas ainda que apresentem um custo elevado de implementação principalmente na área de sensores. Dessa forma, as pesquisas referentes a este problema são e devem estar concentradas na produção de um sistema de interrogação de baixo custo e de alta resolução. Uma outra técnica de interrogação, que é baseada na utilização de FBGs gêmeas visa combater essas desvantagens, sendo apresentada na seção a seguir.

2.2 Interrogação de Redes de Bragg pela Técnica de FBGs Gêmeas

FBGs gêmeas são aquelas que foram fabricadas de modo que seus espectros de reflexão são praticamente idênticos e, o mais importante, centrados no mesmo λ_B . Geralmente, as FBGs de um mesmo lote de produção atendem a esse critério.

A demodulação do sinal de uma FBG com sua gêmea é uma excelente alternativa às técnicas de interrogação de custo elevado apresentadas na Subseção 2.1.4. Esta técnica foi analisada e demonstrada na literatura [10, 12–14, 16–19, 30–32]. Similarmente à técnica com FFP-TF, este método precisa de um filtro para o sinal da FBG e, além disso, a demodulação também se baseia no princípio da convolução. Esse filtro se dá, única e exclusivamente, por uma FBG gêmea à outra. Os perfis de reflexão das FBGs são convolucionados e o sinal resultante é adquirido. A Figura 2.5 mostra o desenho esquemático para a interrogação com FBGs gêmeas.

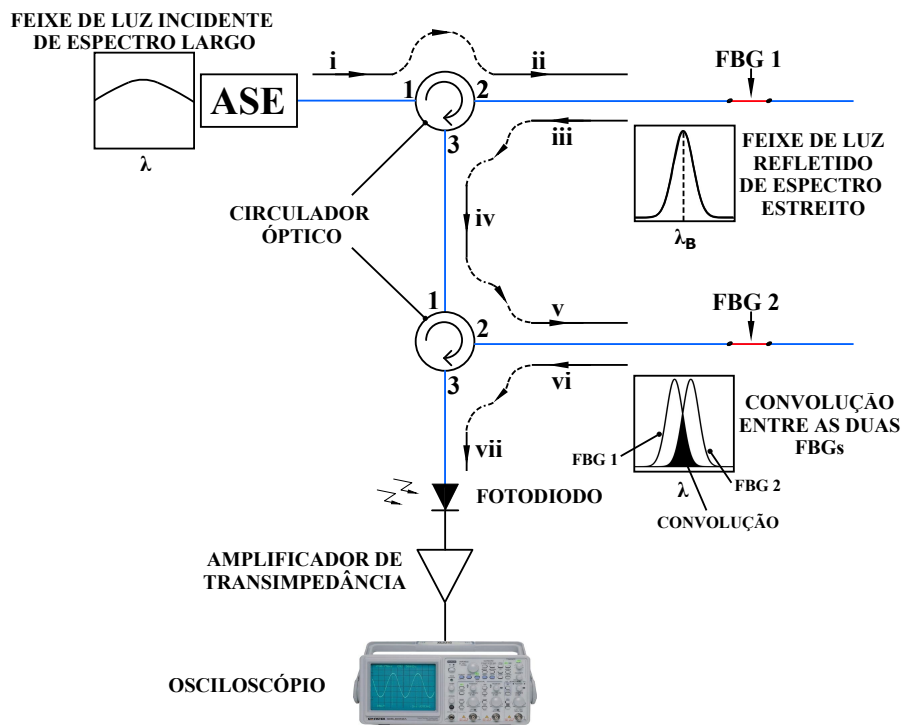


Figura 2.5: Diagrama esquemático para a interrogação do espectro de reflexão de uma FBG com sua gêmea.

Partindo do que foi apresentado na Figura 2.4, após seguir pelo caminho *iv*, o espectro refletido pela FBG 1 passa por um outro circulator óptico, entrando

pela porta 1 e saindo pelo porta 2. Percorrendo o caminho v , alcança a FBG 2 e, portanto, a convolução entre os dois espectros é refletida passando pelo caminho vi , entrando no circulador pela porta 2 e saindo pela porta 3. Em seguida, o caminho vii pode levar esse sinal de convolução a um fotodiodo e assim, após amplificação, ser observado em um osciloscópio.

Este método de interrogação foi utilizado neste trabalho, haja vista suas vantagens, como por exemplo, permitir uma maior resolução e acurácia com relação às técnicas de interrogação que utilizam equipamentos comerciais, o que atende os objetivos desta pesquisa. Foram utilizadas duas FBGs gêmeas da marca Technica SA[©] centradas em $\lambda_B = (1530 \pm 0.5)$ nm, segundo informações técnicas do fabricante. A fim de obter os perfis dos espectros de ambas FBGs, elas foram demoduladas em um OSA da marca Anritsu, segundo esquema da Figura 2.3, apenas para essa finalidade. Pôde ser observado que elas são, de fato, gêmeas, mas centradas em torno de $\lambda_B = 1528,20$ nm, o que pode ser comprovado pelo gráfico da Figura 2.6 onde esses perfis estão representados. Nela observa-se que a curva vermelha representa o espectro de reflexão da FBG colada no sensor (FBG 1 da Figura 2.5) e a curva azul representa o da FBG que filtra o sinal que lhe é entregue (FBG 2 da Figura 2.5).

Está também representada na Figura 2.6 a curva de convolução (verde pontilhada) entre as referidas FBGs, calculada numericamente no *software* MATLAB pela Equação (2.7), adaptada de [33], que define este conceito:

$$f_1(k) * f_2(k) = \sum_{j=-\infty}^{\infty} f_1(j) \cdot f_2(k - j) \quad (2.7)$$

onde $f_1[k]$ e $f_2[k]$ são funções contínuas a serem convolucionadas e τ é a variável independente na integral de convolução.

O perfil de convolução está, como esperado, centrado no mesmo comprimento de onda em que está a FBG filtro, já que é esta que modula a outra FBG. Outro aspecto interessante que vale destacar diz respeito ao pico do perfil de convolução. Este se dá quando os espectros das duas FBGs estão mais casados possível, idealmente quando estão perfeitamente sobrepostas.

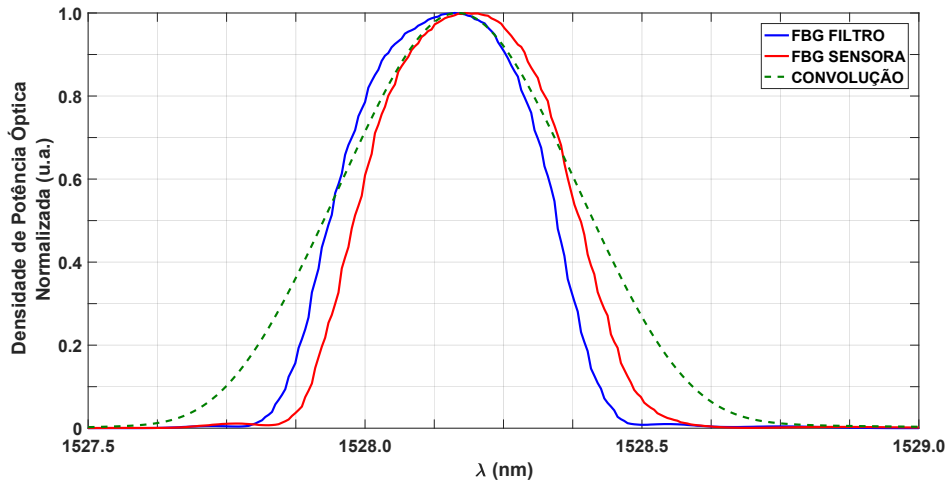


Figura 2.6: Perfis das FBGs gêmeas e de convolução calculado numericamente.

Obviamente, como toda rede de Bragg, a FBG sensora é sensível a variações de temperatura, conforme visto na Equação (2.3). Isso pode ser considerado uma desvantagem dessa técnica, já que um *drift* térmico a que ela estaria sujeita influenciaria o λ_B dessa FBG e, por consequência, alteraria o nível de convolução dela com a FBG filtro, ocasionando uma medição não confiável. Isto é levado em conta para uma aplicação que deseja medir variações no comprimento de onda de Bragg causadas somente por estresse mecânico.

Para resolver este problema, DANTE, A. [34] propôs realizar a interrogação de FBGs gêmeas de maneira insensível a variações de temperatura no sensor por seu controle de sinal de convolução.

2.3 Compensação de Temperatura em Sistemas de Interrogação com FBGs Gêmeas

Como foi discutido na Subseção 2.2, a técnica de interrogação do sinal de uma FBG com sua gêmea apresenta vantagens em relação a outras, mas pode ter uma desvantagem crucial: a interferência da temperatura em medições exclusivas de estresse mecânico.

Uma forma de compensar a interferência da temperatura no sensor seria medi-

la, possibilitando que um controlador pudesse se basear nessa informação e, em seguida, enviar um sinal ao atuador para que este variasse o comprimento de onda de Bragg correspondente da FBG filtro, seja por acionamento térmico ou mecânico. Contudo, a implementação de um sensor eletrônico de temperatura levaria a um projeto mais complexo do sistema de interrogação, além de que não iria de acordo com a motivação desta pesquisa que visa, dentre outras coisas, diminuir a presença da eletrônica. Da mesma forma, um sensor óptico acrescentaria complexidade ao projeto sendo que, sem ele, o objetivo é alcançado da mesma forma.

Para resolver esta questão, DANTE, A. [34] leva em consideração que variações de temperatura no sensor ocorrem a taxas muito pequenas quando comparadas a deformações mecânicas na frequência da rede elétrica (50 Hz ou 60 Hz). Sendo assim, considerando um sensor à rede de Bragg para medir strain sujeito à influência da temperatura, o sinal óptico de convolução entre o espectro da FBG sensora e o da FBG filtro é composto por dois sinais, sendo um deles o nível médio (ou nível DC) que corresponde a variações de temperatura e um outro que apresenta um nível de corrente alternada AC correspondente ao *strain*.

A insensibilidade deste tipo de sistema de interrogação à temperatura se dá pela ação de um controle em um atuador, que funciona para garantir que o nível médio de convolução entre as duas FBGs seja sempre o mesmo para qualquer variação térmica. Sendo assim, o perfil de reflexão da FBG filtro se desloca lentamente no espectro à mesma medida que se desloca o da FBG sensora, quando esta é submetida a variações de temperatura.

A Figura 2.7 ilustra o conceito desta técnica. Está representado nela o espectro de reflexão da FBG sensora, em vermelho, assim como, em pontilhado, seu perfil conforme varia a intensidade do sinal AC do sensor. A curva azul mostra o perfil de reflexão da FBG filtro. No gráfico superior, a FBG sensora se encontra a uma temperatura T_0 no instante $t = t_0$ e o nível de convolução dela com relação à sua gêmea corresponde à área hachurada em preto. Em um intervalo de tempo $\Delta t = t_f - t_0$, a temperatura do sensor muda e atinge o valor $T_f > T_0$, fazendo

com que o perfil de sua FBG se desloque $\Delta\lambda > 0$ no espectro, conforme mostra o gráfico inferior da figura. Portanto, conforme explicado, o perfil da FBG filtro deve se deslocar esse mesmo $\Delta\lambda$ de modo que o nível DC de convolução seja igual àquele quando $T = T_0$ em $t = t_0$, sendo isso evidenciado no gráfico em questão. O atuador do sistema realiza essa função, atuando na FBG filtro conforme o sinal que recebe do controlador, sendo que um bom controle garante que a FBG sensora será imune a variações de temperatura.

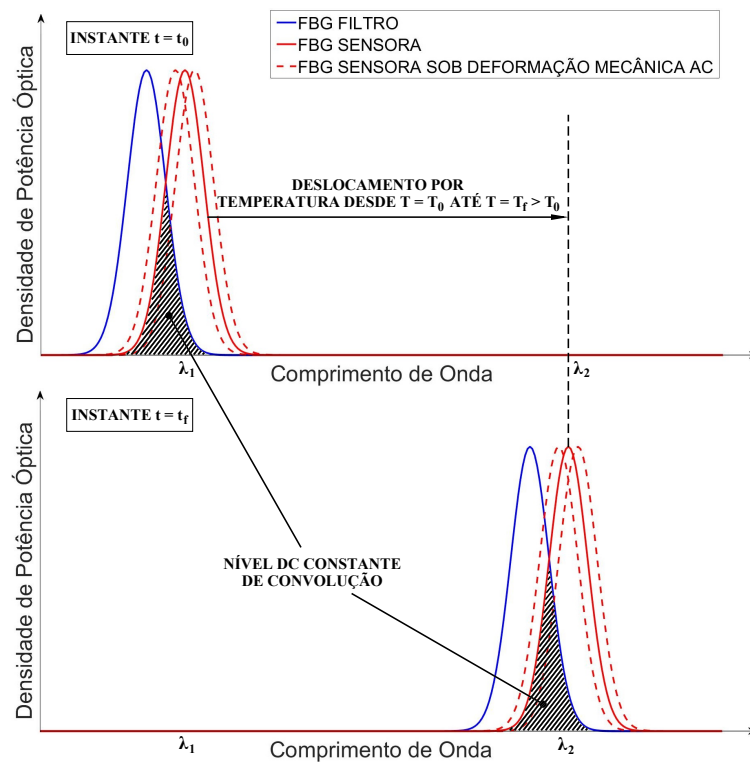


Figura 2.7: Representação gráfica da convolução entre os espectros das FBGs gêmeas independente de variações de temperatura no sensor (adaptado de [34]).

O nível médio de convolução precisa ser escolhido para ser mantido em um ponto adequado da curva experimental de convolução entre as duas FBGs, chamado de ponto de rastreamento (PR). Supondo que ela seja a curva pontilhada da Figura 2.6, a região mais adequada para esse ponto estar situado é a que apresenta maior linearidade. Observando esse gráfico, as regiões mais lineares são as que se encontram, aproximadamente, nos intervalos $[1527,90; 1528,05]$ nm ou $[1528,25; 1528,40]$ nm. Portanto, o PR mais indicado para manter o nível DC de convolução se encontra no valor médio desses intervalos, 1527,98 nm e 1528,33 nm respectivamente, para

que o sinal do sensor possa excursionar em torno dele, garantindo melhor linearidade na saída e uma resposta com distorções harmônicas minimizadas.

Para ficar mais claro esse assunto, a Figura 2.8 mostra graficamente o que acabou de ser explicado. Nela pode ser vista, em vermelho, a curva de convolução, análoga à pontilhada da Figura 2.6. Observa-se também que o ponto de rastreamento está localizado no centro da região mais linear do lado direito dela (onde ocorre toda a excursão) e é onde será mantido o nível médio de convolução. Além disso, o sinal do sensor em azul, que é o sinal de entrada, excursiona em torno desse PR, assim como o sinal AC de convolução de saída, em preto. Logo, é dessa forma que é realizada a demodulação de um sinal AC com uma FBG pelo método das redes gêmeas por controle de sinal de convolução entre elas.

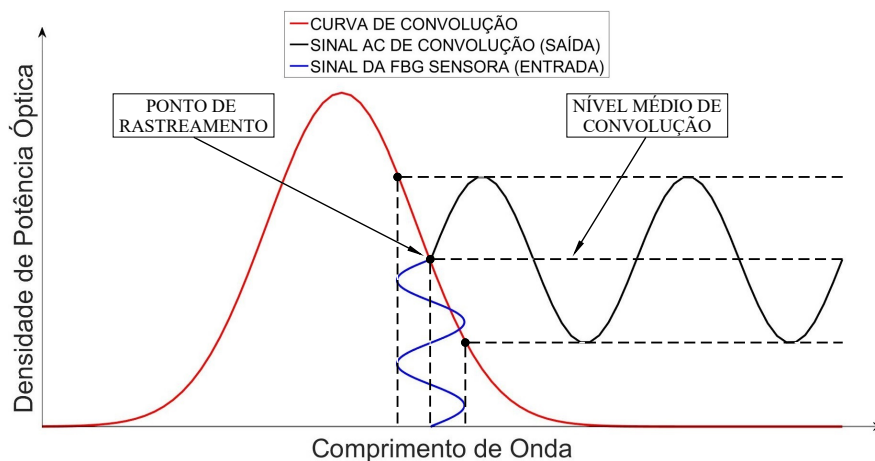


Figura 2.8: Representação gráfica da obtenção do sinal AC de convolução em torno do ponto de rastreamento a partir do sinal do sensor (adaptado de [34]).

2.4 Atuadores Piezoelétricos

Descoberto no ano de 1880 pelos irmãos Pierre e Jacques Curie, o efeito piezoelétrico tem sido bastante pesquisado e empregado em diferentes áreas da indústria. Suas primeiras aplicações se deram na última década de 50 a partir da descoberta da capacidade de polarização de cerâmicas de titanato de bário ($BaTiO_3$), onde esse efeito podia ser observado [35]. Essa descoberta alavancou o mercado de materiais piezoelétricos, possibilitando que, na década seguinte, uma nova cerâmica, dessa vez

de titanato zirconato de chumbo, fosse descoberta, sendo, até hoje, a mais utilizada. Ela é conhecida pela sigla PZT, em sua forma abreviada.

As cerâmicas piezoelétricas são caracterizadas como isotrópicas quando não estão polarizadas. Ao se aplicar um forte campo elétrico sobre essas estruturas, a polarização ocorre fazendo com que os domínios do material que as compõem se alinhem com a direção deste referido campo. Sendo assim, ocorrem deformações estruturais no material, alterando as suas dimensões físicas microscopicamente, ou seja, invisíveis a olho nu. Esse fenômeno é conhecido como efeito piezoelétrico inverso. Analogamente, com a aplicação de uma força mecânica sobre um material piezoelétrico polarizado, ou seja, sendo provocada uma deformação em sua estrutura, uma tensão elétrica será gerada, proporcional à aplicação dessa força. Esse fenômeno é conhecido como efeito piezoelétrico direto.

Nesta pesquisa, o efeito piezoelétrico explorado é o inverso. Aplica-se alta tensão AC sobre um anel PZT, que funciona como um protótipo de sensor. Para entender melhor a relação entre campo elétrico aplicado numa determinada direção e a deformação mecânica que a cerâmica sofre, é preciso representar esse fenômeno numa linguagem matemática tal qual a estabelecida por:

$$\epsilon = d_{ij}E \quad (2.8)$$

onde d_{ij} representa a constante piezoelétrica (em m.V^{-1}) do material da cerâmica nas direções x , y ou z do campo elétrico E aplicado (relacionado a i) e da deformação sofrida ϵ (relacionada a j). Se a direção for x , a numeração representativa é 1; se for y é 2 e z , 3. Por exemplo, dada uma constante piezoelétrica $d_{31} = -200 \times 10^{-12} \text{ m.V}^{-1}$, a deformação ϵ sofrida pelo material é de contração na direção 1 (eixo x) para um campo elétrico de magnitude E aplicado no sentido positivo da direção 3 (eixo z).

Outro fator importante a ser analisado quando se trata de cerâmicas piezoelétricas diz respeito à Temperatura de Curie (T_C). Ela é a temperatura na qual o material piezoelétrico, quando acima desta, muda para o estado despolarizado,

rompendo sua dieletricidade. Ela costuma valer entre 150 °C e 300 °C.

Nesta pesquisa, a cerâmica PZT utilizada é a da Figura 2.9. Ela é fabricada pela Sparkler Ceramics Pvt.Ltd, seu diâmetro externo mede 50,8 mm, seu diâmetro interno vale 38,0 mm e a espessura do anel é de 8,0 mm. Além disso, sua constante piezoelétrica vale $d_{33} = 300 \text{ pm V}^{-1}$.



Figura 2.9: Cerâmica PZT utilizada nesta pesquisa.

2.5 Atuadores Termoelétricos

O fenômeno termoelétrico se dá pela conversão de energia térmica em energia elétrica e vice-versa. Quando um dispositivo termoelétrico opera gerando energia, ele é chamado de gerador termoelétrico (TEG). Nesse caso, dada uma diferença de temperatura no TEG, seus terminais elétricos geram tensão elétrica proporcional a essa diferença de temperatura. Similarmente, quando esse dispositivo é alimentado por uma corrente elétrica, um fluxo de calor passará por ele gerando uma diferença de temperatura. Dessa vez, ele é chamado de refrigerador termoelétrico (TEC).

O termo “efeito termoelétrico” engloba três diferentes efeitos: o efeito Seebeck, que está relacionado à geração de tensão elétrica nos terminais do TEG; o efeito Peltier, que se refere à indução de fluxo de calor em um TEC; e o efeito Thomson, que se diferencia dos outros dois por lidar apenas com único material, e não dois como em um termopar. O que interessa nesta pesquisa é o efeito Peltier, porque o dispositivo termoelétrico utilizado (TEC) tem a finalidade de fornecer ou retirar calor de uma peça de alumínio onde está colada uma FBG.

2.5.1 O Efeito Peltier

O efeito Peltier ocorre quando dois metais diferentes (A e B) compõem um circuito elétrico com uma junção desses materiais [36]. Quando uma corrente elétrica percorre esse circuito, o calor gerado em um dos lados da junção se transfere para o outro lado, aquecendo-o, enquanto que o de origem é resfriado. O calor absorvido (Q) em um dos lados é tal que

$$Q = (\Pi_B - \Pi_A) I \quad (2.9)$$

onde Π_A e Π_B são os coeficientes de Peltier dos metais A e B, respectivamente, e I é a corrente elétrica que flui pelo circuito [37]. Como se pode concluir, a transferência de calor entre os dois lados de uma junção desse tipo depende dos metais que a compõe e da magnitude da corrente elétrica no circuito.

2.5.2 Resfriador Termoelétrico - TEC

A Figura 2.10a mostra como é a estrutura de um TEC. Eles são feitos de dois semicondutores, um do tipo p e outro do tipo n , que precisam ser diferentes para o efeito Peltier ocorrer. Eles são posicionados paralelamente e unidos a um material condutor (tipicamente cobre) que forma os terminais negativo e positivo do TEC. Quando uma tensão elétrica é aplicada, a eletricidade flui pelo circuito formado criando, portanto, uma diferença de temperatura proporcional entre os dois lados do resfriador termoelétrico, já que o calor absorvido por um dos lados é enviado para o outro. O calor é levado através do TEC por elétrons que, ao serem transportados, movem-se de um estado de energia alto para um mais baixo e, conseqüentemente, acabam por liberar calor.

A Figura 2.10b mostra o TEC que foi utilizado nesta pesquisa. Ele é fabricado pela Adaptive Thermal Management, seu modelo é ET-031-10-20, suas dimensões são $(15 \times 15 \times 4,3)$ mm e suas outras especificações estão informadas na Tabela 2.3.

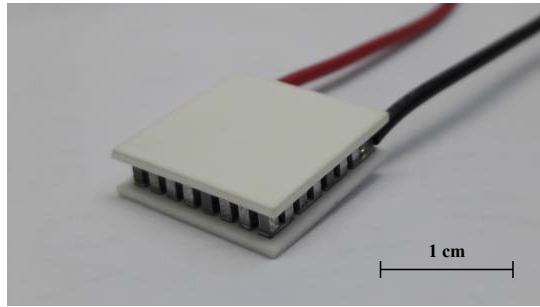
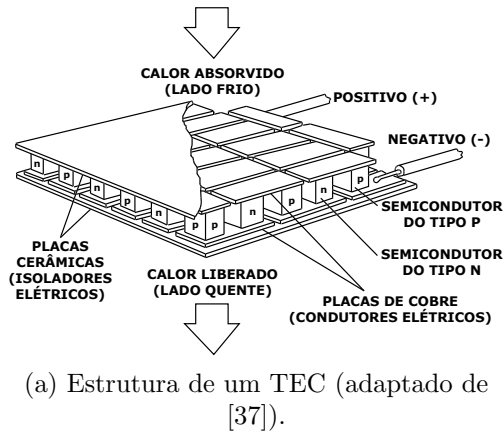


Figura 2.10: Resfriador termoelétrico.

Tabela 2.3: Especificações do TEC ET-031-10-20.

PARÂMETRO	MEDIDA
I_{max}	2,5 A
V_{max}	3,8 V
P_{Cmax}	5,8 W
ΔT_{max}	75 °C

2.6 Aspectos Teóricos de Controle Realimentado Clássico

O funcionamento de uma malha de controle realimentado é ilustrado no diagrama da Figura 2.11. Nesse tipo de controle, é sempre desejado que uma determinada variável assuma um valor de referência. Esse valor desejado $SP(t)$ é comparado com o sinal $y_m(t)$ lido por um **SENSOR**, que pode apresentar ruídos em suas medidas, e a diferença entre eles resulta em um sinal de erro $e(t)$. O **CONTROLADOR** analisa o erro e fornece o sinal de controle $u(t)$ para o **ATUADOR**, de forma que ele atue adequadamente no **PROCESSO**, mesmo que haja um possível distúrbio. O processo, por sua vez, fornece o valor atual da variável que está sendo controlada $y(t)$ e que será medido pelo sensor. Este processo é repetido continuamente para garantir que o sinal de erro seja sempre o mais próximo de zero possível [38, 39].

Neste projeto, esse esquema é implementado para controlar o sinal de convolução das FBGs de forma que ele se mantenha constante. Relacionando o diagrama da

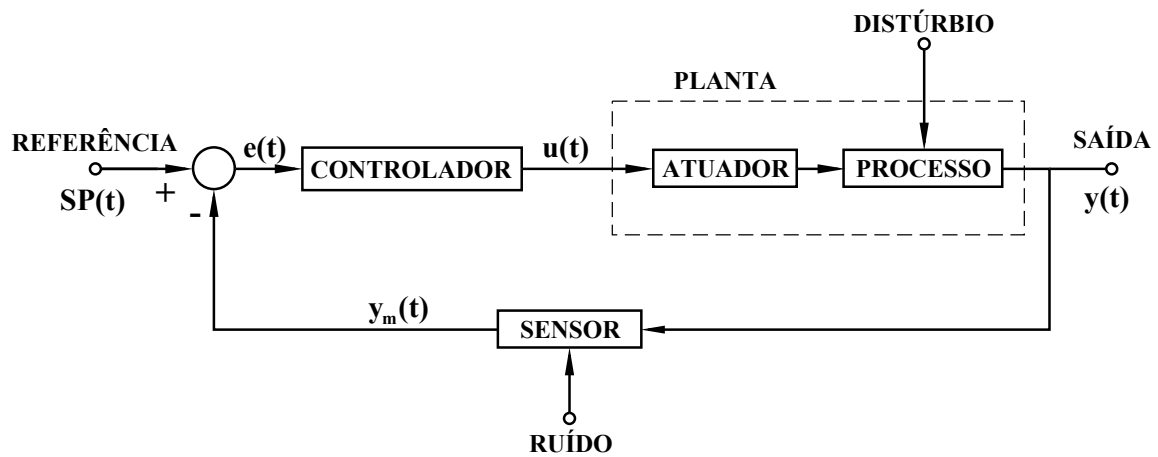


Figura 2.11: Diagrama de blocos dos componentes de um controle realimentado elementar [38].

Figura 2.11 a esta pesquisa, o sinal de referência $SP(t)$ é o nível de intersecção mais adequado entre as duas FBGs, escolhido após análise da curva de convolução; o sinal $y_m(t)$ é o sinal de convolução atual $y(t)$ adquirido pela eletrônica; o controlador é projetado em *firmware* e gravado no microncontrolador; o processo é a FBG filtro que tem seu espectro variado de posição de acordo com a atuação do TEC. O possível ruído na leitura do nível de convolução é desprezível assim como distúrbios no processo, conforme poderá ser visto no Capítulo 4.

Capítulo 3

O Sistema de Interrogação

Este capítulo visa descrever e detalhar o projeto do sistema de interrogação desenvolvido nesta pesquisa. Ele usa um atuador termoelétrico (TEC) com a intenção de viabilizar uma interrogação precisa de sinais do sensor, independentemente de variações de temperatura. Primeiramente, são analisados os requisitos necessários para o projeto do sistema e, em seguida, são detalhadas as partes óptica e eletrônica, assim como toda a parte de *software*.

3.1 Projeto do Sistema de Interrogação

Em recentes pesquisas sobre sensores de alta tensão a partir de transdução feita com fibras ópticas, em especial, as com tecnologia de redes de Bragg, tem sido frequente a utilização de FBGs coladas em materiais piezoelétricos que, quando sob ação do sinal a ser sensorado, apresentam deformações mecânicas que podem ser associadas às respostas de uma FBG, após interrogação [9, 12, 14, 16–18, 27].

Uma desvantagem crítica desse tipo de sensoramento com FBGs se dá pelo fato delas serem sensíveis também a variações de temperatura, conforme visto no Capítulo 2. Uma vez que sensores desse tipo estão associados diretamente a um princípio de transdução relacionado unicamente a deformações mecânicas, sua sensibilidade à temperatura pode fornecer medidas erradas nas leituras realizadas, principalmente quando tais sensores se encontram em ambientes suscetíveis a variações

térmicas. Dessa forma, torna-se necessário compensar os efeitos provocados na FBG por causa de variações de temperatura. Essa compensação é feita neste trabalho a partir de um sistema de interrogação com FBGs gêmeas que, além de possibilitar medidas imunes à variações térmicas no sensor, apresenta um custo mais baixo do que as técnicas citadas na Subseção 2.1.4, assim como a técnica que usa o FFP-TF.

Portanto, nesta pesquisa, foi utilizado um sistema eletrônico de aquisição de sinais ópticos onde estes são devidamente interpretados e processados por um microcontrolador. Esse componente executa o controle e permite a atuação de um TEC, que substitui os tradicionais atuadores piezoelétricos comumente utilizados. Esse processo faz com que seja possível avaliar os sinais de convolução entre as FBGs, fazendo assim a compensação de temperatura sem a necessidade de medir esta grandeza.

Além disso, o sistema de interrogação foi projetado para ser imune às variações de potência óptica da fonte de luz, tendo em vista que flutuações de potência no espectro da luz acoplada à fibra podem gerar medidas erradas. O sistema deve, também, primordialmente, controlar a posição do espectro de reflexão da FBG filtro de forma que o nível de convolução entre ela e o da FBG sensora seja mantido em um valor fixo, independente da temperatura a que a FBG sensora está sendo submetida. Esse valor fixo diz respeito ao ponto de rastreamento mostrado na Figura 2.8, que é escolhido a partir da análise da curva de convolução obtida com precisão. O sistema de interrogação deve, por fim, ser capaz de interrogar sensores de alta tensão ou corrente AC com bastante acurácia para monitorar linhas em subestações, por exemplo.

Sendo assim, para testar em laboratório o sistema de interrogação proposto neste trabalho, foi desenvolvido o *setup* óptico representado na Figura 3.1. O ASE ilumina a fibra óptica e a luz alcança a porta 1 de um circulador óptico e, em seguida, o deixa pela porta 2. Após isso, chega à FBG sensora e o espectro refletido por ela retorna a essa mesma porta, deixando o circulador pela porta 3. Depois disso, a luz alcança a porta 1 de um acoplador óptico 2x2, com razão de acoplamento de 50:50,

que a divide em dois feixes. Como pode ser visto na Figura 3.1, o feixe que sai do acoplador pela porta 3 é lido pelo fotodiodo P1. Já o feixe que sai pela porta 4 do acoplador é guiado para a FBG filtro, localizada sobre a peça de alumínio e sobre o TEC, e refletido de volta ao acoplador óptico, onde é guiado ao fotodiodo P2 através da porta 2.

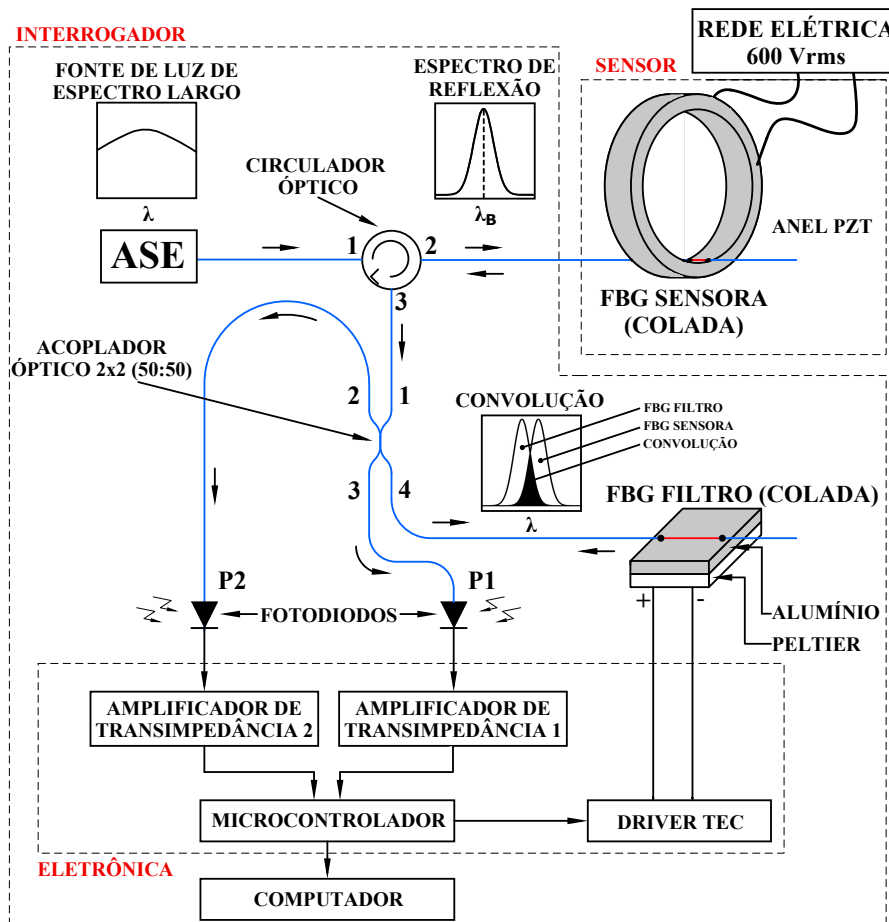


Figura 3.1: *Setup* óptico e eletrônico do sistema de interrogação proposto.

Para a validação do referido *setup*, a FBG sensora foi colada na superfície interior de um atuador PZT em formato de anel, empregado como um protótipo de sensor de alta tensão. Para aumentar o alcance em unidades de comprimento de onda do espectro de reflexão da FBG filtro – aumentando também a capacidade do sistema de interrogação em compensar temperatura – ela foi colada em uma peça de alumínio de forma que sua sensibilidade à temperatura é de $38,0 \text{ pm } ^\circ\text{C}^{-1}$, que diferencia de seu valor teórico ($46,8 \text{ pm } ^\circ\text{C}^{-1}$ para o comprimento de onda das FBGs gêmeas utilizadas, centradas em $\lambda_B = 1528,2 \text{ nm}$, calculado da mesma forma que o resultado

da Equação (2.6) pelo fato deste substrato não ser composto de 100 % alumínio, o que torna diferente o seu coeficiente de dilatação térmica α_{Al} em relação ao valor fornecido pela Tabela 2.2. Esse valor de sensibilidade obtido experimentalmente mede cerca de três vezes a sensibilidade de uma FBG livre e é uma vantagem com relação à pesquisa de DANTE *et al.* [12] porque este aumento proporciona uma maior abrangência do espectro para a compensação de temperatura. A Figura 3.2 mostra ambas FBGs coladas em seus respectivos substratos, tendo sido utilizada uma cola industrial de cianoacrilato (Loctite 401) para tal.



Figura 3.2: FBG sensora colada no diâmetro interior de uma cerâmica PZT em forma de anel. Inset: FBG filtro colada na superfície de um substrato de alumínio.

3.2 Fonte de Luz

Na parte óptica do *setup*, foi utilizada uma fonte de luz ASE da marca Optolink. Ele foi escolhido porque apresenta um espectro de emissão localizado nas bandas S e C de telecomunicações (operando em torno de 1530 nm), cobrindo o espectro característico das FBGs utilizadas e de seus possíveis deslocamentos.

Os parâmetros da fonte de luz podem ser analisados no gráfico da Figura 3.3. Ele foi obtido ao conectar a saída da fonte ao mesmo OSA utilizado para obter os espectros das FBGs da Figura 2.6. Tal equipamento fornece a aquisição de 500

pontos de potência óptica de emissão na faixa de 1515 nm a 1575 nm do ASE utilizado. No gráfico em questão, podem ser observadas a janela de transmissão e a potência óptica de saída características da fonte de luz. Observa-se, também, que o intervalo de maior potência é o que cobre os perfis espectrais das FBGs. Isso é bom porque garante uma razão sinal-ruído (SNR) da fonte de luz mais alta na janela utilizada.

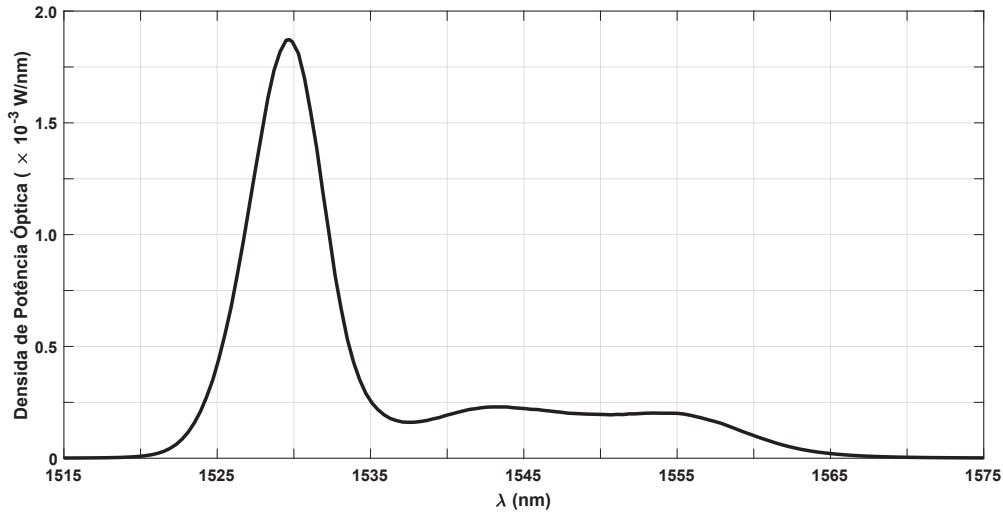


Figura 3.3: Espectro de emissão do ASE obtido experimentalmente no OSA.

Ocorre que, na janela de interesse do espectro, a fonte de luz pode apresentar um *ripple* de potência óptica, o que é comum em equipamentos desse tipo. Sendo assim, quando o pico de reflexão da FBG sensora estiver sendo deslocado por algum motivo, a luz guiada até a FBG filtro sofrerá variações de potência. Isso pode acarretar uma medida de nível de convolução inadequada entre os dois espectros, ocasionando erros nas medidas. Esse inconveniente evidencia a necessidade da implementação de uma técnica para compensar essas flutuações de potência da fonte.

3.3 Compensação de Flutuações de Potência da Fonte de Luz

O *setup* óptico da Figura 3.1 também foi projetado no intuito de prover a compensação de flutuações de potência óptica do ASE. Ela é feita da seguinte forma:

a luz refletida pela FBG sensora é dividida em dois feixes, cada um seguindo pelas portas 3 e 4 do acoplador óptico bidirecional 2x2, respeitando a razão de acoplamento que é de 50:50. O que segue pela porta 4 é filtrado pela outra FBG; já o que segue pela porta 3 do acoplador é enviado diretamente à parte eletrônica do sistema de interrogação, após conversão do sinal óptico para elétrico pelo fotodiodo P1.

O que acontece em seguida está de acordo com o fluxograma da Figura 3.4. Os

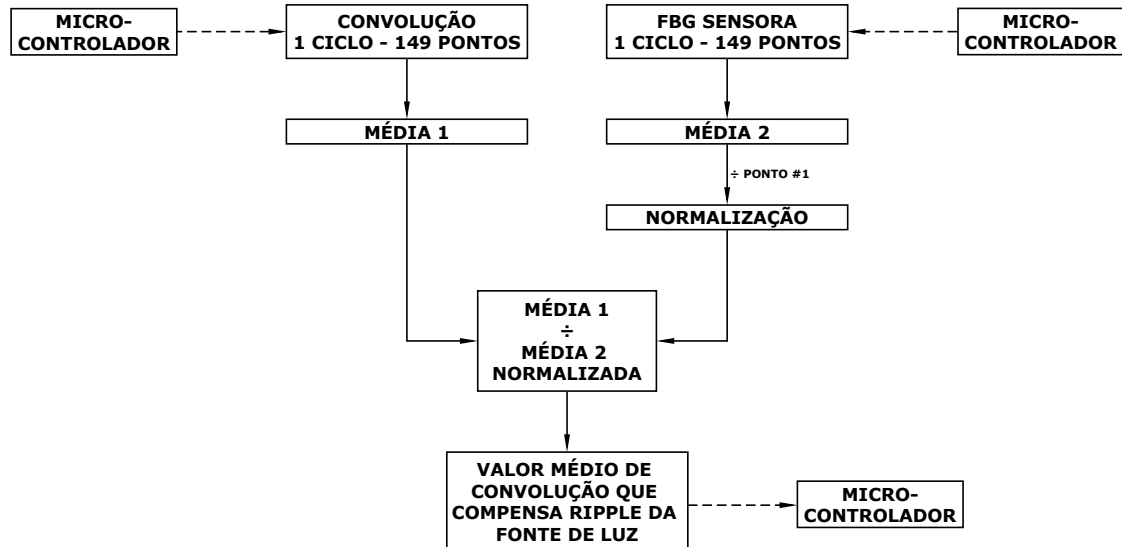


Figura 3.4: Fluxograma da sub-rotina de compensação de flutuações de potência da fonte de luz.

valores de potência luminosa são lidos pelo sistema de aquisição e tratados no *firmware*, que adquire um ciclo do sinal de 60 Hz aplicado ao anel PZT com 149 pontos de dados obtidos pela FBG sensora. Com esses pontos, é calculada uma média (“média 1” do fluxograma) entre eles, que corresponde ao valor médio do ciclo adquirido. Esse valor médio é normalizado dividindo-o pelo primeiro valor do *array* de pontos do ciclo.

Também é calculada uma média (“média 2” do fluxograma) dos valores de convolução lidos a partir do fotodiodo P2, fornecendo, assim, o nível DC de convolução entre os espectros das FBGs. Em seguida, “a média 2” é dividida pela “média 1” normalizada obtendo, então, o valor médio de convolução que compensa o *ripple* da fonte de luz e variações de potência óptica ao longo do caminho óptico entre o sensor e o interrogador. Esse procedimento garante que variações de potência óptica

na convolução entre os espectros das FBGs se deem somente pelo $\Delta\lambda_B$ relativo entre seus picos, e não por uma eventual flutuação de potência óptica da fonte de luz.

3.4 Eletrônica de Interrogação

A Figura 3.1 contém a ilustração da parte eletrônica do *setup* óptico, representada por blocos. Além dos dois fotodiodos, a eletrônica é composta por dois amplificadores de transimpedância, um microcontrolador e um circuito de potência que é o driver para o TEC. Observa-se também nesta figura que os dados necessários para a análise do funcionamento do sistema de interrogação são enviados para um computador.

Os fotodiodos P1 e P2 fazem a transdução do sinal óptico em sinal elétrico, mais especificamente, corrente elétrica. Ela é tratada por amplificadores de transimpedância (1 e 2) que, além de amplificarem o sinal dos fotodiodos, fazem sua conversão para valores de tensão. Dessa forma, os sinais ópticos convertidos podem ser devidamente lidos e processados pelo microcontrolador.

O microcontrolador é o elemento mais relevante para o correto funcionamento da eletrônica. Ele executa funções primordiais como, por exemplo, a aquisição e digitalização do sinal dos amplificadores de transimpedância através de um conversor analógico-digital (ADC) de 10 bits, interno a ele. Além disso, o microcontrolador realiza o processamento dos sinais adquiridos, faz a separação das componentes AC e DC da convolução entre as FBGs e realiza o controle desse sinal DC para que esteja no nível desejado, tudo isso via *firmware*. Por fim, ele proporciona sua comunicação com o computador, onde o operador pode verificar, em tempo real, o funcionamento do sistema de interrogação e alterar o código do *firmware*.

A eletrônica de potência, que compõe o driver do atuador termoeletrico, recebe o sinal de controle do microcontrolador e, em seguida, fornece corrente elétrica para o TEC numa intensidade específica de forma que a variável controlada (potência de convolução) seja mantida, pelo atuador, em um nível pré-determinado.

3.4.1 Projeto da Eletrônica de Interrogação

A aquisição dos sinais ópticos se dá pelos fotodiodos presentes no *setup* da Figura 3.1, que são do fabricante PIN JDS Uniphase, modelo EPM605. Os sinais de fotocorrente gerados por eles são convertidos para tensão por dois amplificadores de transimpedância cujo circuito esquemático está representado na Figura 3.5. Além de fazer essa conversão, eles também amplificam o sinal para que atinjam a ordem de grandeza desejada. Esse sinal amplificado é filtrado antes de ser conduzido a um dos canais do ADC no microcontrolador. Os valores dos componentes utilizados estão indicados na figura em questão, salvo pelo potenciômetro que foi ajustado para fornecer o ganho necessário. O amplificador utilizado é o TL071 da Texas Instruments.

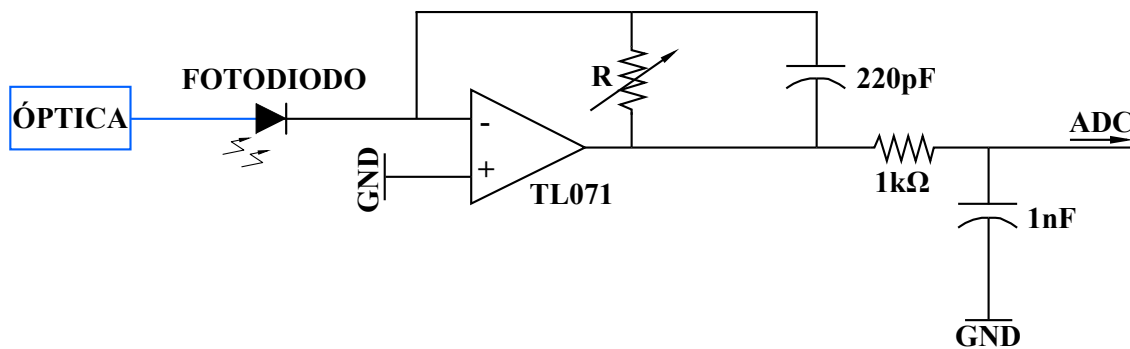


Figura 3.5: Desenho esquemático do circuito amplificador de transimpedância da eletrônica de interrogação.

O microcontrolador utilizado é o ATmega328P pertencente à plataforma Arduino, modelo Uno. Ele opera com tensão de 5 V e trabalha com uma velocidade de clock de 16 MHz além de possuir 32 KB de memória flash. Sua memória interna de acesso aleatório (RAM) tem capacidade de armazenar 2 KB de dados e o ADC interno a ele possui 10 bits de resolução e arquitetura de aproximações sucessivas.

O driver do TEC, esquematizado na Figura 3.6, é um circuito eletrônico de potência, contendo uma lógica digital, um circuito pré-amplificador e uma ponte H. A lógica digital proporciona ao *firmware* a troca de sentido da corrente somente pela variação de um sinal lógico; a pré-amplificação eleva a tensão dos sinais de saída do circuito digital para os níveis necessários, e a ponte H é a estrutura do driver que,

de fato, fornece a corrente para o TEC.

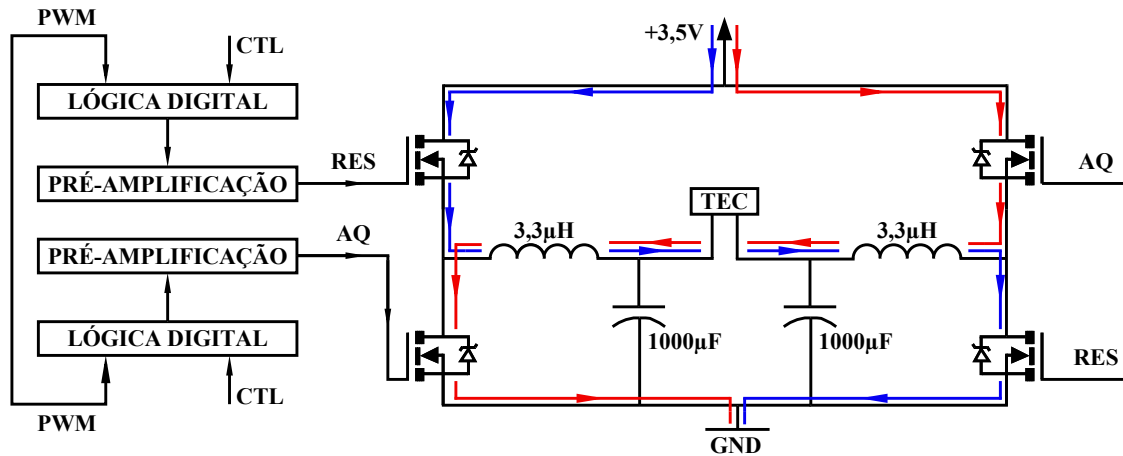


Figura 3.6: Desenho esquemático do circuito do driver do TEC.

A ponte H é composta por quatro transistores de efeito de campo (FET) do tipo canal-N (IRF540) e um filtro LC devidamente projetado, além de permitir a implementação da carga a ser utilizada. Os FETs são ativados pela lógica digital apenas em pares alternados para possibilitar o fluxo de corrente em ambos os sentidos no atuador termoelétrico. A fonte de tensão utilizada para alimentar o TEC foi limitada em $3,5\text{ V}$ e em $1,0\text{ A}$, tendo em vista as características do peltier utilizado nesta pesquisa (Tabela 2.3). A corrente elétrica que passa pelo TEC está representada pelas linhas vermelha e azul e pelas setas, que representam o caminho e o sentido pelo qual que fluem. A linha de cor vermelha está relacionada à corrente que aquece a FBG filtro e a azul, a que a esfria.

Como é um sinal modulado por largura de pulso (PWM) que controla o acionamento dos FETs, a corrente elétrica que sai da fonte também estará modulada por largura de pulso. Esse tipo de sinal não é adequado para a operação do TEC, tornando necessária sua filtragem antes de alimentar a carga. Para isso, foi projetado um filtro LC, que transforma esse sinal em um nível DC e, para que não haja interferência da ressonância do filtro, se torna necessário considerá-la de forma que ela seja menor que um quinto da frequência de operação do sinal PWM, que funciona em 32 kHz . Portanto, o valor em questão tem que ser menor que $6,4\text{ kHz}$. De acordo com a equação a seguir, que define a frequência de ressonância de um

filtro LC:

$$f_R = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (3.1)$$

onde f_R é a frequência de ressonância do filtro, L é a indutância empregada e C a capacitância utilizada, o termo \sqrt{LC} precisa ser projetado de forma que

$$LC > \frac{1}{4\pi^2(f_R)^2} \quad (3.2)$$

o que é atendido pelos valores $L = 3,3 \mu\text{H}$ e $C = 1000 \mu\text{F}$ para $f_R < 6,4 \text{ kHz}$.

Os sinais PWM e CTL são direcionados a uma lógica digital que oferece ao *firmware* a troca de sentido da corrente somente pela variação do sinal lógico CTL. A saída dos circuitos digitais já fornecem os sinais necessários para a ponte H mas, em sua implementação, foi verificado experimentalmente o consumo de uma parte da energia desses sinais, tornando-os inviáveis para utilização. Desta forma, um circuito pré-amplificador foi projetado para fornecer uma tensão suficiente para os elementos da ponte H.

Após amplificação, os sinais resultantes são os chamados RES e AQ, segundo a Figura 3.6. RES está relacionado ao resfriamento da FBG filtro enquanto que AQ, ao aquecimento. Observa-se que cada um desses sinais é capaz de ativar um par alternado de transistores FET de acordo com a estrutura da ponte H.

A Tabela 3.1 representa a tabela verdade das combinações possíveis dos sinais PWM e CTL na entrada da lógica digital, assim como os sinais RES e AQ de saída.

Tabela 3.1: Tabela verdade para os sinais da lógica digital.

PWM	CTL	RES	AQ
0	0	0	0
0	1	0	0
1	0	0	1
1	1	1	0

Observando a Figura 3.7, que exemplifica graficamente esses sinais com o tempo,

verifica-se que, quando o sinal PWM está em nível lógico baixo, nenhum par de FETs é ativado. Por outro lado, quando está em nível alto, dependendo do sinal CTL, a corrente elétrica fornecida pela fonte de 3,5 V percorre a carga em um dos dois sentidos durante o intervalo de tempo do pulso do sinal PWM, acionando o par de transistores correspondente.

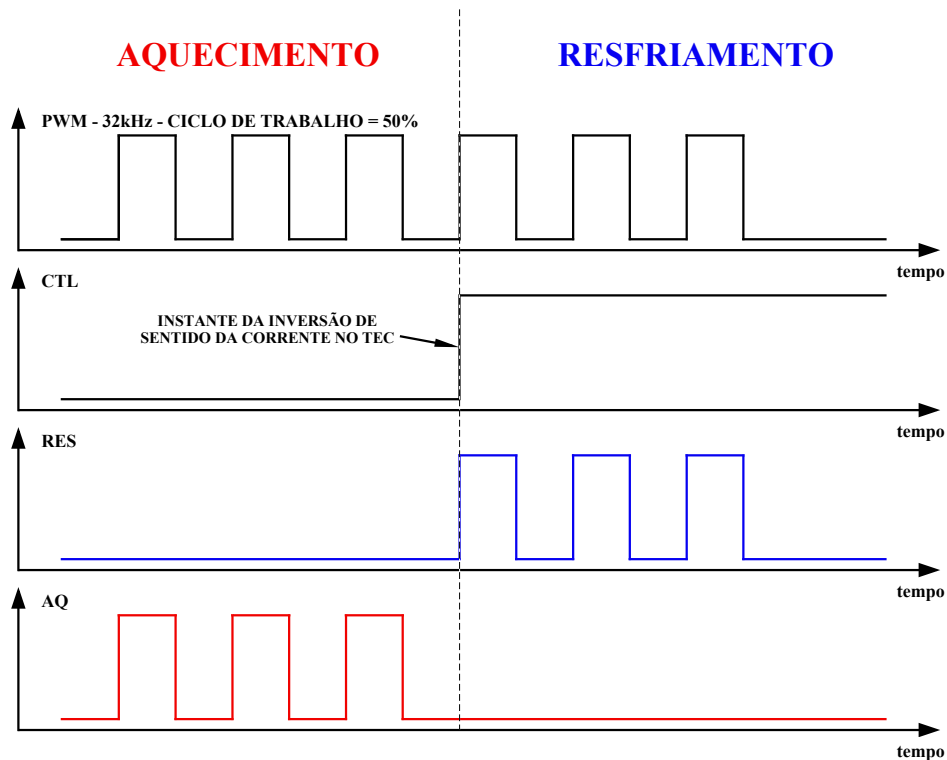


Figura 3.7: Representação gráfica dos sinais lógicos PWM, CTL, RES e AQ.

3.4.2 *Firmware* Embarcado

Para realizar as tarefas necessárias ao correto funcionamento do sistema de interrogação, entre elas a compensação do *ripple* de potência da fonte de luz, o microcontrolador precisa ser programado via *firmware* com as suas sub-rotinas devidamente definidas.

Uma das tarefas implementadas em *firmware* diz respeito à varredura da FBG por um intervalo suficiente que cubra todo o espectro da FBG sensora, de forma que se possa obter a curva de convolução entre elas. Essa curva fornece o ponto ótimo de rastreamento ao qual o nível DC de convolução entre os espectros das FBGs será

mantido.

A tarefa principal implementada em *firmware* é a que faz a compensação automática de variações de temperatura no sensor. Conforme o processo explicado na Seção 2.3, a FBG filtro tem seu espectro de reflexão característico deslocado, de acordo com o sinal de controle fornecido pelo microcontrolador, até que a convolução entre os dois espectros esteja no nível desejado. Esse sinal alimenta o TEC e é calculado no *firmware* baseado nos sinais ópticos recebidos pelos fotodiodos.

Quando a FBG sensora está sob operação normal em um sensor de tensão ou corrente AC, o sinal de convolução obtido pela sobreposição dos espectros das FBGs possui componentes AC e DC, que são separadas através da implementação, também em *firmware*, de um filtro digital, que calcula a média dos 149 pontos adquiridos de um período do sinal. Essa média corresponde ao nível DC de convolução enquanto que a componente AC é o sinal de tensão demodulado e possui frequência correspondente à qual ocorrem as deformações mecânicas na FBG sensora, que está colada no anel PZT.

As vantagens da implementação desse filtro na forma digital estão na redução da complexidade de *hardware*, tendo em vista que não é necessário implementá-lo na forma analógica, e na facilidade de sua customização para sinais da rede elétrica em 50 Hz, por exemplo. A fim de ilustrar o que foi desenvolvido em *firmware* embarcado no microcontrolador, a Figura 3.8 mostra um fluxograma das tarefas realizadas por ele, assim como a sequência em que ocorrem.

3.5 Princípio de Operação do Sistema de Interrogação

Quando o sistema de interrogação é ligado, a primeira sub-rotina executada no *firmware* faz a varredura de todo o alcance possível da FBG filtro, em temperatura, pela atuação do TEC, de 2 °C a 70 °C. Um dos objetivos dessa sub-rotina é adquirir toda a curva de convolução entre os espectros de ambas FBGs para checar se a FBG

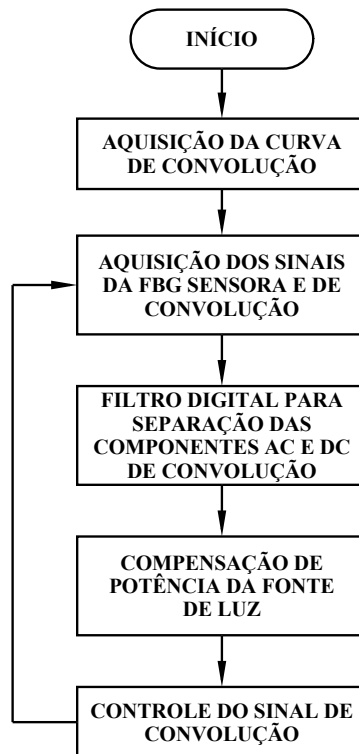


Figura 3.8: Fluxograma representativo das tarefas do microcontrolador definidas em *firmware*.

sensora está, inicialmente, dentro dos limites de operação da FBG filtro. Além disso, ela tem o objetivo de determinar o ponto ótimo de operação do sistema (o PR em que o sinal de saída apresenta a menor distorção comparado com o sinal de entrada) [12, 16].

Após a aquisição de toda a curva de convolução, a rotina principal é executada. Ela faz a aquisição de um ciclo dos sinais da FBG sensora, cujo sensor ao qual ela foi colada está submetido à alta tensão, e de convolução. Cada ciclo contém 149 pontos e uma média de cada ciclo é realizada, implementando um filtro notch digital que atenua completamente a componente de 60 Hz do sinal. Dessa forma, obtém-se o nível médio desses sinais em questão. Em seguida, a compensação de flutuações de potência do ASE é feita utilizando esses valores de média e seguindo o passo-a-passo do fluxograma da Figura 3.4.

A rotina principal também comanda o funcionamento do controle proporcional-integral-derivativo (PID), cujo principal objetivo é manter a FBG filtro rastreando a FBG sensora, que está suscetível a sofrer deslocamentos no espectro induzidos por

temperatura. Isso faz com que o nível médio de convolução seja mantido constante, o que equivale a dizer que o sensor é independente das variações térmicas, e possa ser realimentado para a rotina principal de controle. Tendo ele sido efetuado, a separação entre os picos de reflexão de cada FBG ($\Delta\lambda_B = |\lambda_{B,FBG\text{sensora}} - \lambda_{B,FBG\text{filtro}}|$) permanece constante. Portanto, a técnica de interrogação proposta permite que medições do sinal AC da FBG sensora estejam imunes a variações de temperatura e que seja dispensada a utilização de um sensor exclusivo para essa finalidade. Isso é uma vantagem com relação a outras técnicas de interrogação passivas que realizam compensação de temperatura.

Capítulo 4

Resultados e Discussões

Neste capítulo são descritos os experimentos realizados e os resultados obtidos nas medições de tensão com o sistema de interrogação desenvolvido.

4.1 Montagem em Bancada do *Setup* do Sistema de Interrogação

Deseja-se, portanto, ilustrar a montagem do *setup* da Figura 3.1 através de fotos explicativas tiradas em laboratório. A Figura 4.1 a seguir mostra a montagem realizada na sala de ensaios de alta tensão e alta corrente (SEATAC) em que é aplicada a tensão ao protótipo de sensor. Nela é possível observar o transformador que fornece tensão mais alta aos eletrodos, as ponteiras de prova 1:1000 utilizadas para reduzir a amplitude do sinal de tensão para que possam ser lidos pelo multímetro e pelo osciloscópio localizado do lado de fora da SEATAC, e o protótipo de sensor com a FBG sensora colada sobre ele.

Do lado de fora da SEATAC, encontram-se o computador que monitora o funcionamento do sistema de interrogação, as fontes de tensão que alimentam a eletrônica e o TEC, o ASE, o osciloscópio que disponibiliza o sinal da rede, e toda a parte óptica, que compreende circulador óptico, acoplador óptico, FBG filtro e fibras. Uma foto geral da montagem do *setup* com esses componentes se encontra na Figura 4.2.

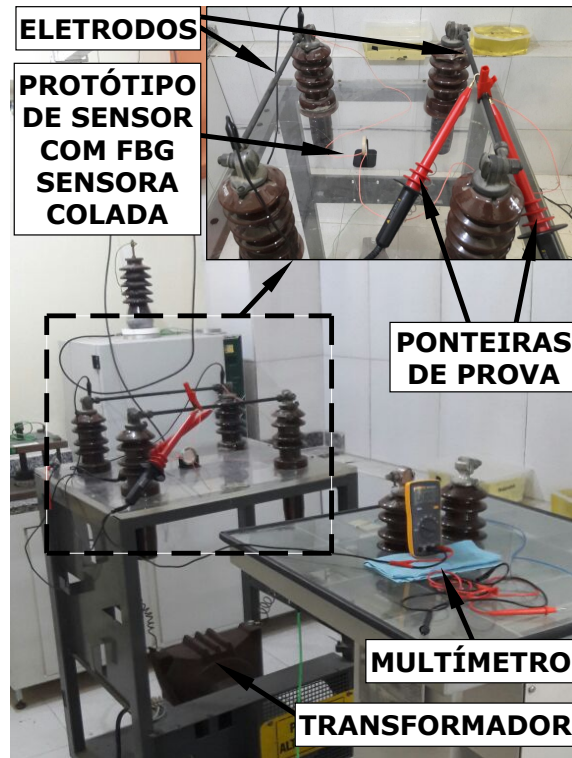


Figura 4.1: Estrutura montada na sala de ensaios em alta tensão para implementação do protótipo de sensor e para acompanhamento do valor eficaz do sinal aplicado.

A eletrônica é composta pela placa de circuito impresso (PCB) e pelo *hardware* conhecido como ARDUINO UNO, que contém o microcontrolador. As fontes de tensão que alimentam a eletrônica são duas, pois ela precisa de alimentação simétrica para os amplificadores de transimpedância. A terceira fonte é utilizada para fornecer corrente ao TEC. O osciloscópio, além de mostrar o sinal da rede, realiza o cálculo da FFT deste sinal e o exibe, podendo seus dados serem salvos em um pen drive para análise posterior. Essa montagem permite uma análise prévia do funcionamento do sistema de interrogação.

4.2 Implementação e Testes da Rotina Principal de Controle

Para realizar um teste preliminar do sistema de interrogação, o *setup* experimental da Figura 3.1 foi montado. A malha de controle da Figura 2.11 adaptada ao sistema

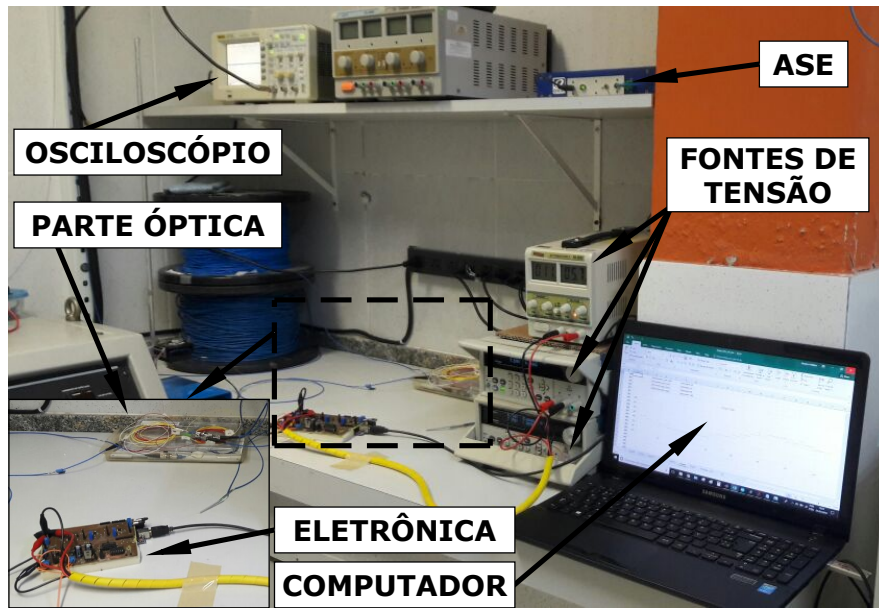


Figura 4.2: *Setup* óptico montado em bancada do sistema de interrogação.

de interrogação proposto fica definida conforme a da Figura 4.3. O *setpoint* do controlador é correspondente ao sinal $p_{SP}(t)$ e o sinal de convolução entre as FBGs é dado por $p_{CONV}(t)$. O sinal $q(t)$ representa o calor fornecido pelo TEC à FBG filtro, que terá seu pico de reflexão deslocado, alterando, por sua vez, a potência de convolução $p_{CONV}(t)$ atual. O ganho K modela essa transferência de energia de forma que $p_{CONV}(t) = K.q(t)$.

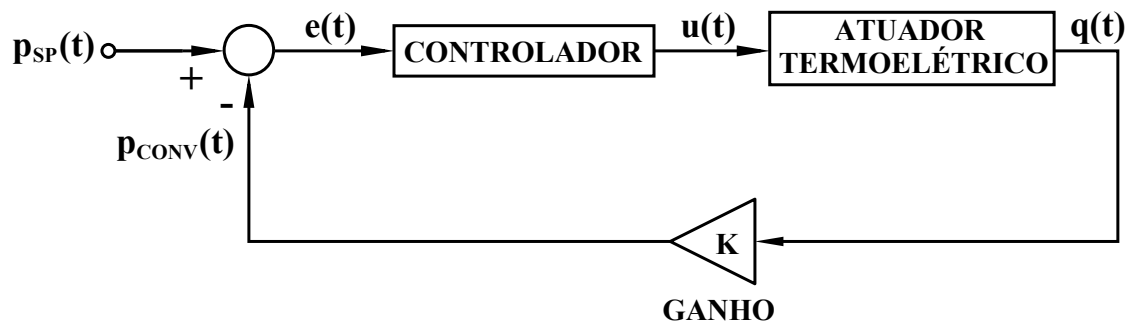


Figura 4.3: Diagrama de blocos da malha de controle presente no sistema de interrogação proposto.

O *setpoint* $p_{SP}(t)$ foi previamente definido no *firmware* e a rotina principal de controle foi realizada depois do sistema ter sido ligado. Os sinais de erro $e(t)$ e de controle $u(t)$ são calculados e utilizados para controlar o TEC através de um driver PWM implementado com uma ponte H completa, cuja entrada analógica também é fornecida pelo microcontrolador.

A cada ciclo do *loop* de controle da Figura 4.3, o sinal analógico do amplificador de transimpedância 2 é amostrado e digitalizado, e o filtro digital pertencente à rotina principal de controle separa suas componentes AC e DC. A componente DC é armazenada na variável correspondente $p_{CONV}(t)$ e aplicada à malha de controle.

A Figura 4.4 mostra um gráfico em função do tempo, representando o início do funcionamento da rotina principal de controle quando o sistema eletrônico é ligado. É possível ver que o valor de $p_{CONV}(t)$ (linha vermelha) é próximo de zero no início, o que significa que o pico de reflexão da FBG filtro não está nem mesmo parcialmente sobreposto ao pico de reflexão da FBG sensora. Conforme a FBG filtro é aquecida, seu espectro se desloca para a direita e começa a se sobrepor ao pico de reflexão da FBG sensora, o que leva $p_{CONV}(t)$ a aumentar seu valor até o ponto ótimo de operação, que é representado por $p_{SP}(t)$ (linha azul). Pode ser visto também que, em meio minuto, a rotina principal de controle está funcionando e mantendo a FBG filtro rastreando a FBG sensora sob variações no comprimento de onda induzidas por mudanças lentas na temperatura. Além disso, o controlador garante a manutenção de $e(t) \sim 0$, o que significa que ambas FBGs estão parcialmente sobrepostas nas condições desejadas, como se espera de um controlador eletrônico funcional.

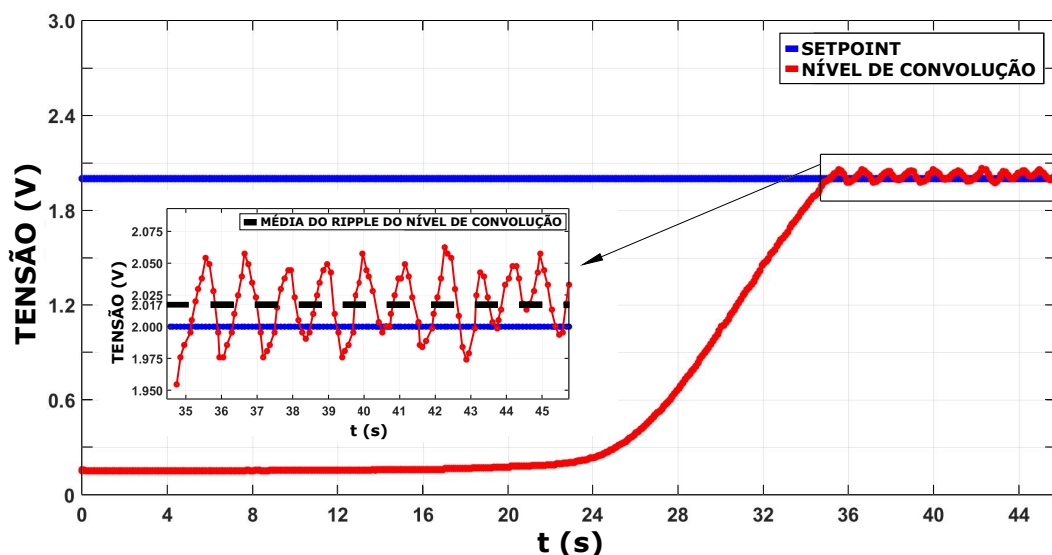


Figura 4.4: Gráfico mostrando a variável controlada $p_{CONV}(t)$ alcançando o *setpoint* $p_{SP}(t) = 2,0$ V, provando o correto funcionamento do controlador.

No estado estacionário, o nível de convolução apresenta um *ripple* em torno do

setpoint por causa do ruído e de características inerentes aos componentes ópticos e eletrônicos do sistema de interrogação. No gráfico interno à Figura 4.4, pode ser observado o referido *ripple*, que representa o controlador PID atuando para manter a FBG filtro rastreando a FBG sensora através do tempo. Também é possível observar que o controle mantém o nível DC de convolução (sobreposição entre as duas FBGs) dentro de um intervalo de ~ 100 mV, que é aproximadamente equivalente a 5×10^{-3} pm, representando um grande feito para um sistema de interrogação de baixo custo.

Esse valor de variação do nível DC de convolução em unidades de comprimento de onda foi calculado segundo as Equações (2.3) e (2.8). Sabe-se que a FBG está colada na parte interna do protótipo de sensor, e seu comprimento é igual à espessura do anel piezoelétrico. Portanto,

$$\Delta z = L_{FBG} = L_{PZT} \quad (4.1)$$

e

$$\Delta L_{FBG} = \Delta L_{PZT} \quad (4.2)$$

Baseado na equação geral referente ao efeito piezoelétrico e nos parâmetros correspondentes envolvidos na pesquisa ($d_{ij} = d_{33}$), a Equação (2.8) fica resumida à seguinte forma:

$$\epsilon_{PZT} = d_{33}E \quad (4.3)$$

onde $\epsilon_{FBG} = \epsilon_{PZT} = \frac{\Delta L_{PZT}}{L_{PZT}}$ e $E = \frac{\Delta V_{pp}^{AC}}{L_{PZT}}$. Dessa forma,

$$\frac{\Delta L_{PZT}}{L_{PZT}} = d_{33} \frac{\Delta V_{pp}^{AC}}{L_{PZT}} \quad (4.4)$$

e, portanto,

$$\Delta L_{PZT} = d_{33} \Delta V_{pp}^{AC} \quad (4.5)$$

Tendo como base a Equação (2.3) e também sabendo que $\Delta T = 0$, pois a temperatura a qual a FBG em questão está sendo submetida é compensada, ela pode ser escrita conforme segue, nomeando $\Delta \lambda_B = \Delta \lambda_{B,pp}^{AC}$:

$$\frac{\Delta \lambda_{B,pp}^{AC}}{\lambda_B} = (1 - \rho_e) \epsilon_{FBG} = (1 - \rho_e) \frac{\Delta L_{FBG}}{L_{FBG}} \quad (4.6)$$

e, portanto,

$$\Delta \lambda_{B,pp}^{AC} = \lambda_B (1 - \rho_e) \frac{\Delta L_{FBG}}{L_{FBG}} = \lambda_B (1 - \rho_e) \frac{d_{33} \Delta V_{pp}^{AC}}{L_{FBG}} \quad (4.7)$$

Utilizando os valores já informados, $\lambda_B = 1528,2$ nm e $d_{33} = 300$ pmV⁻¹, e considerando a tensão de pico a pico da rede aplicada no protótipo de sensor correspondente a $\Delta V_{pp}^{AC} = 1640,5$ V, cujo valor foi obtido a partir do seu valor eficaz de tensão (RMS) $V_{RMS} = 580$ V, obtém-se

$$\Delta \lambda_{B,pp}^{AC} \simeq 73,3 \text{ pm} \quad (4.8)$$

que significa o quanto que o espectro da FBG se desloca em toda a sua amplitude, de acordo com a tensão da rede aplicada no anel PZT. A sensibilidade dessa relação se dá por

$$S = \frac{\Delta \lambda_{B,pp}^{AC}}{\Delta V_{pp}^{AC}} = \frac{73,3 \text{ pm}}{1640,5 \text{ V}} \simeq 44,68 \text{ pmV}^{-1} \quad (4.9)$$

Portanto, dado que há uma variação no nível DC de convolução ($\Delta V_{DC CONV} \simeq 100$ mV), seu valor correspondente em comprimento de onda ($\Delta \lambda_{DC CONV}$) é tal que

$$\Delta \lambda_{DC CONV} = S \Delta V_{DC CONV} \quad (4.10)$$

obtendo

$$\Delta\lambda_{DC CONV} \simeq 4,3 \times 10^{-3} \text{ pm} \quad (4.11)$$

Esse valor de resolução para o sistema de interrogação é dez mil vezes menor que o de equipamentos comerciais como o OSA Anritsu MS9740A, que apresenta resolução mínima de 30 pm, e mil vezes menor que o interrogador Micron Optics si155, que proporciona resolução de 1 pm em suas medidas.

Dessa forma, fica bastante claro perceber que o sistema de interrogação proposto proporciona uma resolução altíssima em sua implementação, garantindo que o nível DC de convolução se mantenha constante dentro de um intervalo de escala sub-picométrica devido à excelente qualidade da compensação de temperatura. Sendo assim, o sistema é capaz de fornecer medidas muito precisas, atendendo o objetivo proposto no Capítulo 1, Seção 1.3.

4.3 Medidas de Tensão com Compensação de Temperatura

Um experimento foi conduzido para calcular o nível de convolução de ambos os espectros das FBGs, submetidas a diferentes condições de temperatura no protótipo de sensor. Para caracterizar o sistema de interrogação proposto em medidas de sinais AC, um protótipo de sensor de alta tensão foi montado. Ele consiste em um atuador piezoelétrico em forma de anel (PZT-4, $d33 = 300 \text{ pm/V}$, Sparkler Piezoceramics Pvt Ltd) que foi imerso em uma pequena vasilha cheia com óleo dielétrico que pode ser aquecido por um equipamento que controla a temperatura do óleo em questão. O protótipo com a FBG sensora colada a ele foi aquecido dentro do banho de óleo até $50 \text{ }^\circ\text{C}$ sem sinal de tensão aplicado a ele. Em seguida, a vasilha foi colocada em uma bancada para se conduzir os testes com tensão AC até 600 Vrms. Após isso, medidas de tensão foram feitas com o protótipo de sensor de alta tensão sendo resfriado desde $47,7 \text{ }^\circ\text{C}$ até próximo à temperatura ambiente, em torno de $29,7 \text{ }^\circ\text{C}$.

Para esse experimento, o sinal de tensão de entrada foi gerado por um transformador de potencial conectado a um transformador variável (VARIAC) que, por sua vez, foi conectado à rede principal do laboratório (127 Vrms, 60 Hz). Sendo assim, a tensão AC amplificada da rede elétrica foi aplicada ao protótipo.

É importante notar que não está no escopo deste trabalho a implementação de um sensor óptico de alta tensão real com todas as suas características necessárias. Portanto, o protótipo de sensor de alta tensão foi montado somente para testes preliminares do sistema de interrogação e para testar sua performance durante medidas de tensão AC, independente de variações de temperatura na região sensora.

A Figura 4.5 mostra a estabilidade do nível DC de convolução adquirido durante variações de temperatura do protótipo de sensor de alta tensão. Medidas de temperatura foram feitas com um termopar tipo K submerso na mesma vasilha contendo o óleo e o protótipo de sensor de alta tensão.

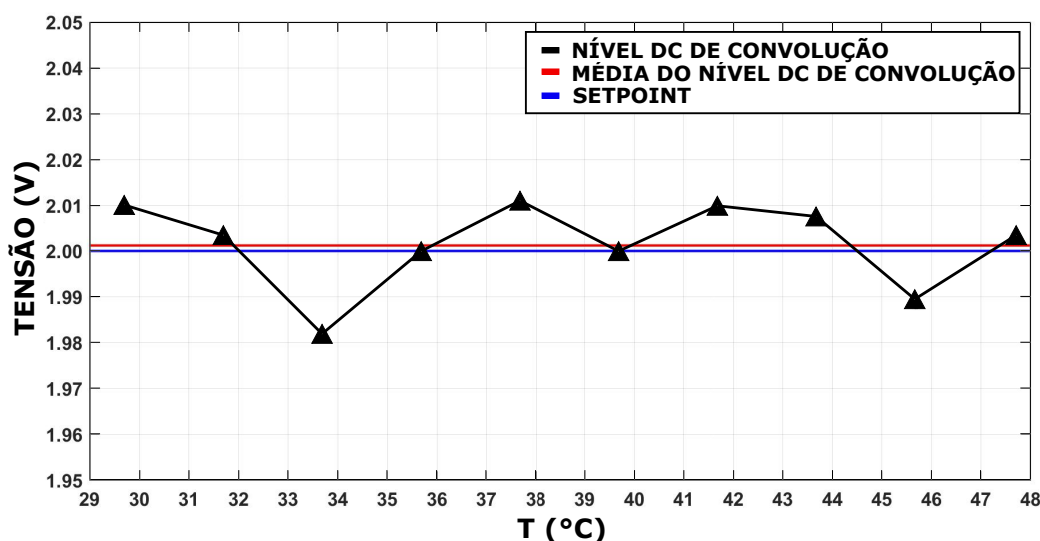


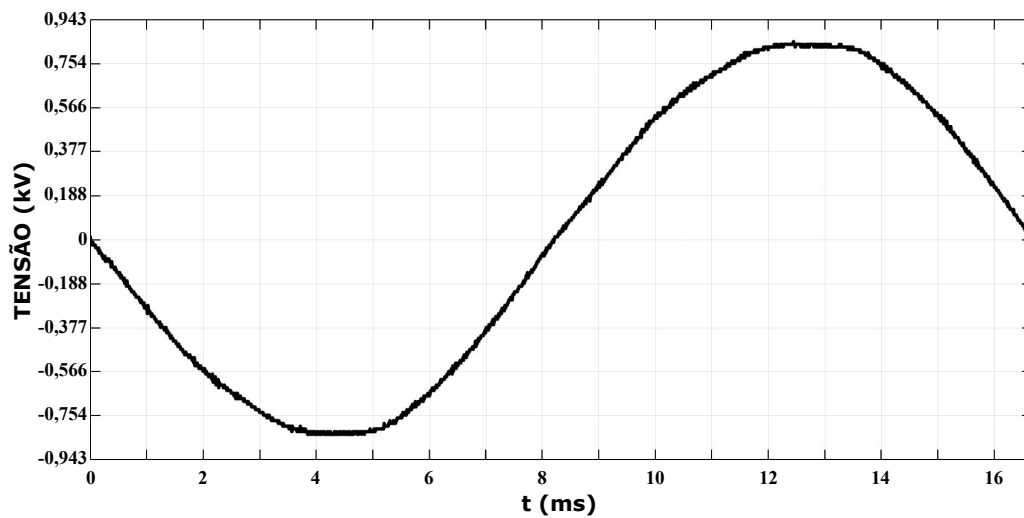
Figura 4.5: Compensação de temperatura realizada pelo sistema de interrogação proposto.

Pode ser observado que o desvio máximo dos pontos de dados experimentais em torno do *setpoint* (linha horizontal azul à 2 V) é de 30 mV, o que mostra a alta estabilidade alcançada pelo controle implementado. A linha vermelha no gráfico representa a média dos dados experimentais, medindo 2,0012 V, o que significa um erro de 0,06 % do *setpoint* desejado.

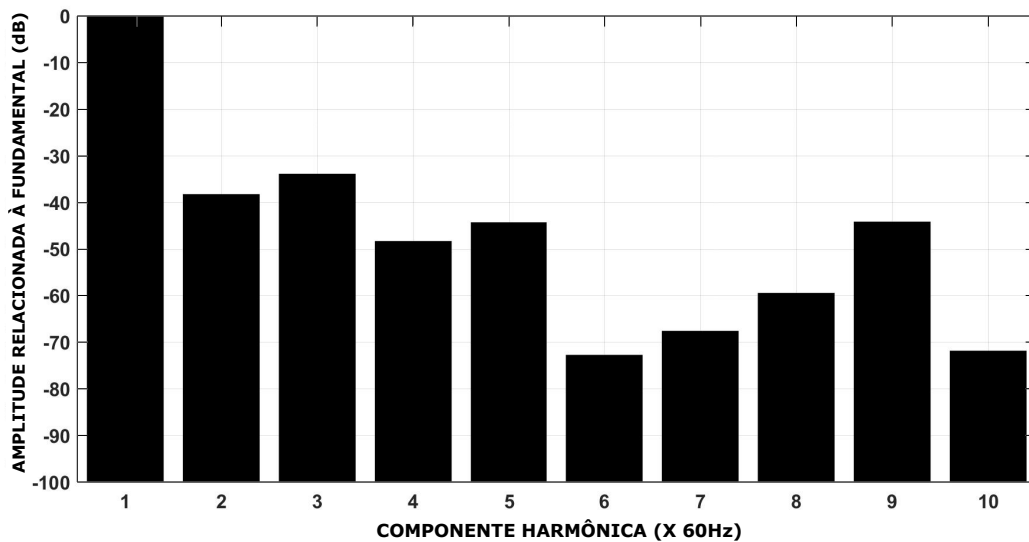
É importante notar que o rastreamento da FBG sensora pela FBG filtro é de-

pendente da taxa de variação das mudanças de temperatura no sensor. O quão mais lentas são as variações de temperatura, melhor é o controle por causa da latência do controlador.

Enquanto é feita a compensação de temperatura, o sistema de interrogação também adquire o sinal óptico AC, que é separado do seu nível DC pelo filtro digital implementado em *firmware*. As Figuras 4.6a e 4.6b mostram um ciclo da tensão de entrada aplicada aos eletrodos do protótipo de sensor de alta tensão e sua FFT com 149 pontos calculada com o *software* MATLAB, sem fazer média, respectivamente.



(a)

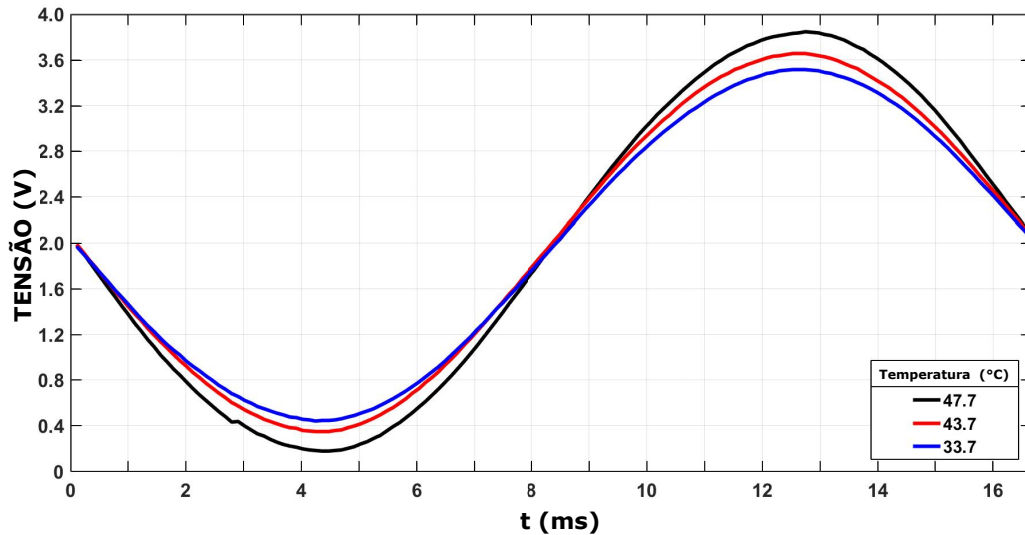


(b)

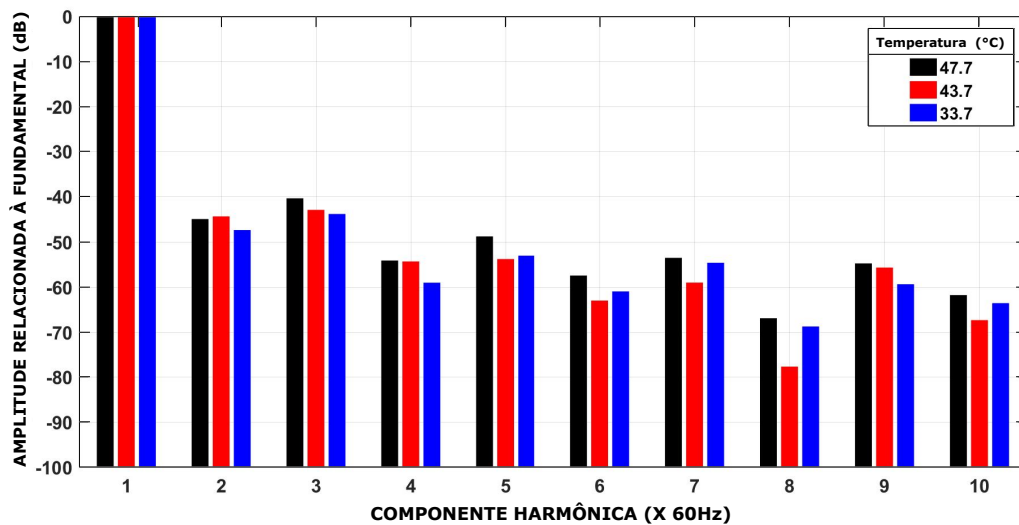
Figura 4.6: (a) Sinal de tensão AC da rede elétrica e (b) de sua FFT.

Para uma comparação entre os sinais de entrada e saída e a caracterização do

sistema de interrogação, as Figuras 4.7a e 4.7b mostram três aquisições de um ciclo do sinal de saída e suas FFTs com 149 pontos cada, calculadas com o *software* MATLAB, sem fazer média, respectivamente. Três sinais foram adquiridos com o protótipo de sensor sob três temperaturas diferentes: 33,7 °C, 43,7 °C, e 47,7 °C.



(a)



(b)

Figura 4.7: (a) Sinais de saída adquiridos pelo sistema de interrogação desenvolvido, sob três temperaturas diferentes medidas no ambiente de sensoriamento e (b) de suas FFTs.

Uma comparação entre os níveis da FFT mostrados nas Figuras 4.6b e 4.7b nos permite concluir que a composição espectral dos sinais de saída é bem correlacionada ao da entrada. Esse resultado é de grande importância porque mostra que o

sistema de interrogação desenvolvido é capaz de medir sinais AC independente de variações de temperatura na região do sensor. Além disso, o sistema de interrogação desenvolvido elimina a necessidade de utilização de um sensor de temperatura.

No entanto, é possível ver na Figura 4.7a que existe uma pequena diferença nas amplitudes dos sinais de saída obtidos sob três temperaturas diferentes, embora o sinal de entrada seja o mesmo para cada um deles. Esse resultado significa que existem diferentes valores de sensibilidade para cada valor de temperatura, o que pode ser explicado por uma mudança no comportamento da cola utilizada para colar a FBG sensora que, para este caso, não é a ideal. Existem colas próprias para a colagem de fibras ópticas. No entanto, para tornar possível eventuais descolagens da fibra, é mais prático e seguro, do ponto de vista de não danificar as FBGs, utilizar a cola da marca Loctite. Isso porque esse fabricante comercializa um produto que permite descolar o que foi colado com seus produtos. Portanto, fica possível recolar uma fibra óptica com FBG quantas vezes forem necessárias, sem inutilizá-las.

Mesmo assim, é importante notar que a mudança na sensibilidade observada está relacionada ao protótipo do sensor de tensão, não ao sistema de interrogação.

Capítulo 5

Conclusões e Trabalhos Futuros

Neste capítulo final, todo o projeto do sistema de interrogação e os principais resultados obtidos com eles serão resumidos. Após as discussões a respeito desses fatores, serão sugeridas algumas melhorias para os trabalhos que possam seguir nessa linha de pesquisa.

5.1 Conclusões

Nesta pesquisa, um sistema de interrogação optoeletrônico em malha fechada de sensores à FBG foi montado e testado. Primeiramente projetado no intuito de possibilitar a interrogação aplicada à medida de variáveis físicas induzidas por *strain* na faixa de frequências AC (50-60 Hz), o sistema proposto é baseado numa técnica de interrogação por redes de Bragg gêmeas, que é independente de variações de temperatura. O sistema de interrogação desenvolvido foi testado em laboratório com um protótipo de sensor de alta tensão sob uma variação de temperatura de mais de 20 °C com uma boa estabilidade dos sinais de saída, mostrando que ele é capaz de manter a FBG filtro rastreando a FBG sensora.

Uma das vantagens do sistema proposto se dá pelo fato dele não realizar uma compensação de temperatura utilizando um sensor desta grandeza no ambiente da FBG filtro, como foi feito por Ribeiro *et al.* [16]. Ao invés disso, o sistema desenvolvido se baseia na medida do sinal óptico de convolução entre os espectros de

reflexão das duas FBGs (sensora e filtro). Dado que variações de temperatura na região onde se localiza o sensor ocorrem a uma taxa muito menor do que o *strain* aplicado à FBG sensora – o que é real para a maioria dos ambientes análogos a este – os efeitos térmicos podem ser facilmente separados do *strain* por filtragem do sinal de convolução [12]. Após isso, um controle em malha fechada é empregado para manter a FBG filtro rastreando a FBG sensora sob variações de temperatura a baixas frequências, enquanto que as variações de comprimento de onda $\Delta\lambda_B$ em alta frequência induzidas por *strain* são medidas com precisão no ponto que apresenta melhor linearidade disponível, dados os espectros característicos de reflexão de ambas as FBGs empregadas. Além disso, uma vez que um resfriador termoelétrico baseado no efeito Peltier é empregador como um atuador de baixo custo em conjunto com a FBG filtro, o sistema proposto é facilmente expansível para o monitoramento de um *array* de FBGs sensoras.

Os resultados experimentais mostraram que o controle em malha fechada é capaz de manter o espectro da FBG filtro dentro de um intervalo em comprimento de onda ($\Delta\lambda$) de 5×10^{-3} pm. Esse é um resultado importante já que a estabilidade do ponto de rastreamento PR está diretamente relacionado ao nível de distorção do sinal de saída.

Além disso, uma importante característica do sistema desenvolvido está no fato de que ele é consideravelmente mais robusto do que sistemas de interrogação passivos baseados em FBGs gêmeas nos quais a FBG filtro é simplesmente colocada no mesmo ambiente ou no mesmo substrato em que está a FBG sensora, com a finalidade de rastrear seu pico. Isso pode ser demonstrado pelo fato de um sistema de controle em malha fechada ativo permitir que o sistema de interrogação opere com um menor nível de distorção, baseado na melhor porção linear disponível do espectro da FBG filtro. O sistema de interrogação pode, também, ser aplicado na análise de vibrações, como por exemplo, vibrações sísmicas, uma vez que também ocorrem em alta frequência.

5.2 Trabalhos Futuros

Mudanças no sistema de interrogação proposto incluem a melhoria da resolução do conversor analógico-digital empregado, o que permitiria melhorias no controle e, também, nas medidas. Outra importante melhoria está relacionada ao refinamento do controle PID, o que ocasionaria a melhora na estabilidade em rastrear o *setpoint*, reduzindo ainda mais a distorção no sinal de saída e melhorando a razão sinal-ruído nas medidas do sistema de interrogação.

O sistema de interrogação desenvolvido está atualmente sendo empregado em transformador óptico de tensão da classe de 13,8 kV em desenvolvimento, para testes experimentais em condições reais de operação e os resultados completos do sistema será assunto de um outro artigo para publicação.

Referências Bibliográficas

- [1] ABB – Asea Brown Boveri. *Instrument Transformers – Technical Information and Application Guide*. Guia Técnico 1VAP420003-TG, North Pinetops, NC, 2004. Citado na página 2.
- [2] AHUJA, D., PARANDE, D. “Optical sensors and their applications”, *Journal of Scientific Research and Reviews*, v. 1, n. 5, pp. 60–68, 2012. Citado nas páginas 2 e 3.
- [3] LIMA, D. K. *Transformadores para instrumentos ópticos: aspectos da viabilidade do seu uso pelas empresas do setor elétrico brasileiro*. Tese de D.Sc., USP, São Paulo, SP, Brasil, 2009. Citado na página 2.
- [4] LEE, B. “Review of the present status of optical fiber sensors”, *Optical Fiber Technology*, v. 9, n. 2, pp. 57–79, 2003. Citado na página 3.
- [5] ZIBAILI, M. I., LATIFI, H., KARAMI, F., et al. “In vivo brain temperature measurements based on fiber optic Bragg grating”, *25th Optical Fiber Sensors Conference (OFS)*, pp. 1–4, 2017. Citado na página 3.
- [6] HILL, K. O., FUJII, Y., JOHNSON, D. C., et al. “Photosensitivity in optical fiber waveguides: Application to reflection filter fabrication”, *Applied Physics Letters*, v. 32, n. 10, pp. 647–649, 1978. Citado nas páginas 3 e 7.
- [7] WANG, L., FANG, N., DING, F., et al. “Simultaneous measurements of vibration, temperature and humidity using a SOA-based fiber Bragg grating laser”, *Asia Communications and Photonics Conference and Exhibition*, pp. 304–305, 2010. Citado na página 3.
- [8] LI, K. “Review of the strain modulation methods used in fiber Bragg grating sensors”, *Journal of Sensors*, v. 2016, 2016. Citado na página 3.
- [9] YANG, Q., HE, Y., SUN, S., et al. “An optical fiber Bragg grating and piezoelectric ceramic voltage sensor”, *Optical Fiber Technology*, v. 88, n. 10, 2017. Citado nas páginas 3 e 27.

- [10] FUSIEK, G., NELSON, J., NIEWCZAS, P., et al. “Optical voltage sensor for MV networks”, in *Proceedings of IEEE Sensors*, pp. 1–3, 2017. Citado nas páginas 3 e 16.
- [11] SARKAR, B., MISHRA, D. K., KOLEY, C., et al. “Intensity-Modulated Fiber Bragg Grating Sensor for Detection of Partial Discharges Inside High-Voltage Apparatus”, *IEEE Sensors Journal*, v. 16, n. 22, pp. 7950–7957, 2016. Citado na página 3.
- [12] DANTE, A., BACURAU, R. M., SPENGLER, A. W., et al. “A Temperature-Independent Interrogation Technique for FBG Sensors Using Monolithic Multilayer Piezoelectric Actuators”, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, v. 65, n. 11, pp. 2476–2484, 2016. Citado nas páginas 3, 16, 27, 30, 39 e 53.
- [13] NAZARÉ, F. V. B., WERNECK, M. M. “Compact Optomagnetic Bragg-Grating-Based Current Sensor for Transmission Lines”, *IEEE Sensors Journal*, v. 15, n. 1, pp. 100–109, 2015. Citado nas páginas 3 e 16.
- [14] FUSIEK, G., NIEWCZAS, P. “Laboratory investigation of an intensimetric dual FBG-based hybrid voltage sensor”, *24th International Conference on Optical Fibre Sensors*, v. 9634, pp. 963444–1–963444–4, 2015. Citado nas páginas 3, 16 e 27.
- [15] YAO, Y., ZHOU, C., ZHANG, W., et al. “A fiber Bragg grating direct current sensor with temperature compensation based on electromagnetic force”, *Advances in Mechanical Engineering*, v. 7, n. 3, 2015. Citado na página 3.
- [16] RIBEIRO, B. A., WERNECK, M. M., NAZARÉ, F. B. V., et al. “A Bragg grating tunable filter based on temperature control system to demodulate a voltage sensor”, *24th International Conference on Optical Fibre Sensors*, v. 9634, pp. 963444–1–963444–4, 2015. Citado nas páginas 3, 4, 16, 27 e 39.
- [17] 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, 2015. Citado nas páginas 3, 4 e 16.
- [18] RIBEIRO, B. A., WERNECK, M. M., SILVA-NETO, J. L. “Novel Optimization Algorithm to Demodulate a PZT-FBG Sensor in AC High Voltage

Measurements”, *IEEE Sensors Journal*, v. 13, n. 4, pp. 1259–1264, 2013. Citado nas páginas 3 e 16.

- [19] CREMONEZI, A. O., FERREIRA, E. C., FILHO, A. J. B., et al. “A Fiber Bragg Grating RMS Current Transducer Based on the Magnetostriction Effect Using a Terfenol-D Toroidal-Shaped Modulator”, *IEEE Sensors Journal*, v. 13, n. 2, pp. 683–690, 2013. Citado nas páginas 3 e 16.
- [20] TIWARI, U., THYAGARAJAN, K., SHENOY, M. R., et al. “EDF-Based Edge-Filter Interrogation Scheme for FBG Sensors”, *IEEE Sensors Journal*, v. 13, n. 4, pp. 1315–1319, 2013. Citado na página 3.
- [21] PERRY, M., ORR, P., NIEWCZAS, P., et al. “High-Speed Interferometric FBG Interrogator With Dynamic and Absolute Wavelength Measurement Capability”, *Journal of Lightwave Technology*, v. 31, n. 17, pp. 2897–2903, 2013. Citado na página 3.
- [22] PFRIMER, F. W. D., KOYAMA, M. H., FERREIRA, E. C., et al. “Closed-loop interrogation techniques for temperature measurement using fibre Bragg gratings”, *Proceedings of the International Conference on Photonics, Optics and Laser Technology*, pp. 35–39, 2013. Citado na página 3.
- [23] PFRIMER, F. W. D., KOYAMA, M., DANTE, A., et al. “A Closed-Loop Interrogation Technique for Multi-Point Temperature Measurement Using Fiber Bragg Gratings”, *Journal of Lightwave Technology*, v. 32, n. 5, pp. 971–977, 2014. Citado na página 4.
- [24] OTHONOS, A., KALLI, K. *Fiber Bragg Gratings – Fundamentals and Applications in Telecommunications and Sensing*. 2 ed. Norwood, MA, Artech House, 1999. Citado nas páginas 10 e 8.
- [25] KASHYAP, R. *Fiber Bragg Gratings*. 2nd ed. Burlington, MA: Academic Press, 2010. Citado nas páginas 8, 10 e 11.
- [26] TRPKOVSKI, S., WADE, S. A., COLLINS, S. F., et al. “Er³⁺:Yb³⁺ doped fibre with embedded FBG for simultaneous measurement of temperature and longitudinal strain”, *Measurement Science and Technology*, v. 16, n. 2, pp. 488, 2005. Citado na página 10.
- [27] D. S. B. ALLIL, R. C., WERNECK, M. M. “Optical High-Voltage Sensor Based on Fiber Bragg Grating and PZT Piezoelectric Ceramics”, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, v. 60, n. 6, pp. 2118–2125, 2011. Citado nas páginas 11, 11 e 27.

- [28] WU, Q., SEMENOVA, Y., SUN, A., et al. “High resolution temperature insensitive interrogation technique for FBG sensors”, *Optics Laser Technology*, v. 42, n. 4, pp. 653–656, 2010. Citado na página 14.
- [29] NUNES, L. C. S. *Análise da técnica de demodulação baseada em filtros fixos para interrogação de sensores a rede de Bragg em fibras ópticas*. Tese de D.Sc., Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, PUC-Rio, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2004. Citado na página 14.
- [30] FERREIRA, L., SANTOS, J., FARAH, F. “Pseudoheterodyne demodulation technique for fiber Bragg grating sensors using two matched gratings”, *IEEE Photonics Technology Letters*, v. 9, n. 4, pp. 487–489, 1997. Citado na página 16.
- [31] JACKSON, D. A., RIBEIRO, A. B. L., REEKIE, L., et al. “Simple multiplexing scheme for a fiber-optic grating sensor network”, *Optics Letters*, v. 18, n. 14, pp. 1192–1194, 1993. Citado na página 16.
- [32] ZHAN, Y., YU, M., PEI, J., et al. “A linearity interrogation technique with enlarged dynamic range for fiber Bragg grating sensing”, *Optics Communications*, v. 283, n. 18, pp. 3428–3433, 2010. Citado na página 16.
- [33] DINIZ, P. S. R., SILVA, E. A. B., NETTO, S. L. *Processamento Digital de Sinais – Projeto e Análise de Sistemas*. 2 ed. Porto Alegre, RS, Brasil, Bookman, 2004. Citado na página 17.
- [34] 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., Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, Brasil, 2016. Citado nas páginas 18, 19, 20 e 21.
- [35] HEYWANG, W., LUBITZ, K., WERSING, W. *Piezoelectricity: evolution and future of a technology*. Springer Science & Business Media, 2008. Citado na página 21.
- [36] KHODE, S. S., KALE, P., GANDHILE, C. “Review on Application of Thermoelectric Peltier Module in cooling and power generating Technology”, *International Journal of Engineering and Technical Research (IJETR)*, pp. 2321–0869, 2015. Citado na página 24.
- [37] PATIL, P., PATIL, A. “Review on thermoelectric devices”, *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, v. 3, n. 10, pp. 681–688, 2013. Citado na página 24.

- [38] FRANKLIN, G., POWELL, J., EMAMI-NAEINI, A. *Sistemas de Controle para Engenharia - 6ed.* Bookman, 2013. Citado na página 25.
- [39] DORF, R., BISHOP, R. *Sistemas de Controle Modernos.* LTC, 2009. Citado na página 25.

Apêndice A

Artigo Submetido para Publicação

Este apêndice apresenta um artigo sobre este trabalho que foi produzido por mim em conjunto com outros autores, submetido em 24/07/2018 para o Periódico IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, conceito QUALIS/CAPES A2. Ele se encontra sob revisão para nova submissão.

A Temperature-Compensated FBG Sensor Interrogator Based on Thermoelectric Actuator

Gustavo Marques Mattos, Alex Dante, Regina Célia da Silva Barros Allil, Cesar Cosenza de Carvalho and Marcelo Martins Werneck

Abstract—In this paper, a closed-loop interrogation optoelectronic system for fiber Bragg grating (FBG) sensors applied to measurements of AC signals, such as voltages and currents, is presented. The interrogation system developed is based on a twin-grating technique, in which the optical power reflected by a sensing-FBG is intensity-modulated by a filter-FBG and the position of the reflection peak of the sensor is related to the optical power measured. A microcontrolled optoelectronic system is employed to perform measurements of the optical power reflected by the FBGs and a closed-loop control is implemented in firmware in order to keep the filter-FBG tracking the sensing-FBG over temperature variations employing a thermoelectric cooler (TEC) as actuator. The developed interrogation system was tested with a prototype of high-voltage sensor under temperature variation from 29°C up to 50°C and the filter-FBG was kept tracking the sensing-FBG over its entire temperature-induced Bragg wavelength shift ($\Delta\lambda_B$) without the need for a temperature sensor. Experimental results showed that the proposed interrogation system is capable of keeping the filter-FBG tracking the sensing-FBG with a maximum deviation of 5×10^{-3} pm from the optimal point of operation. Frequency-domain analysis of the output AC signals showed that the developed system is capable of performing measurements at the least-distortion point of operation available. Furthermore, the developed system can also be adapted for the monitoring of vibration, such as in the predictive maintenance of motors and turbines, and in seismic vibrations.

Index Terms—Bragg gratings, compensation, fiber gratings, optoelectronic and photonic sensors, temperature, thermoelectric devices.

I. INTRODUCTION

OPTICAL fiber sensors (OFS) have been making an enormous impact on modern instrumentation and measurement systems due to excellent properties of optical fibers, such as immunity to electromagnetic interference (EMI), malleability, low weight, high electrical isolation, chemical compatibility for operation in a variety of hazardous environments, and compatibility to in-vivo monitoring systems [1]–[3].

One type of OFS that has been popularized in recent decades is the Fiber Bragg grating (FBG), which is a few millimeters long, passive, embedded inside the fiber core sensor that may be implemented as a quasi-distributed sensor array in one optical cable, presenting several advantages

This work was supported by the Brazilian federal funding agency – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, CAPES.

Mattos, G., Dante, A., Allil, R. C. S. B., Carvalho, C. C., and Werneck, M. M. are with the Instrumentation and Photonics Laboratory, Electrical Engineering Program, Federal University of Rio de Janeiro, 21949-900 (e-mail: gustavo@lif.coppe.ufrj.br, alex@lif.coppe.ufrj.br, regina@lif.coppe.ufrj.br, cesar@lif.coppe.ufrj.br, and werneck@lif.coppe.ufrj.br).

over conventional sensors. Since its discovery in 1978 [4], FBGs have been extensively studied and employed as suitable sensors for a great number of physical parameters, from temperature and strain to electric and magnetic fields, force, acceleration, pressure, and vibration [5], [6]. In the electric power industry, for instance, there is an increasing number of papers reporting the application of FBGs in the development of OFSSs, particularly for the monitoring of critical parameters of high-voltage transmission lines, as reported by [7]–[17].

In order to avoid measurement errors, due to the mutual effect between the variation of temperature versus the mechanical stress, the interrogation system of an FBG-based sensor should promote the separation of the cross-sensitivity between them, such as demonstrated in [10], [16], [18]–[20]. In [11], the authors proposed an FBG-based current sensor for high-voltage lines in which a twin-grating interrogation was applied for temperature-compensated measurements. In [14], a temperature compensation was proposed for a high-voltage sensor in which the temperature of the sensor is measured and an FBG used as a filter tracks the sensing-FBG by the actuation of a thermoelectric cooler (TEC) in a closed-loop. In [21], the same technique was implemented but without the need of an additional temperature sensor. The closed-loop controls the convolution signal between the FBGs. Dante *et al.* [10] proposed the same temperature-independent technique for FBG-based sensors, therefore, it was used a monolithic multilayer piezoelectric actuator (MMPA) to allow the tracking of the filter-FBG. However, a MMPA is little available on the market than a TEC. Fusiek *et al.* [15] compensated temperature variations by attaching each half of a single FBG to two materials: a piezoelectric actuator and invar as an extended electrode for the PZT. This process splits an FBG spectrum into two peaks where their relative position is associated to AC measurements without temperature influence.

In this work, we report the development of an optoelectronic interrogation system for FBG sensors applied to the measurement of strain (or other physical variable that induces strain to the sensing-FBG) employing the so-called twin grating interrogation technique that is independent of temperature variations. The interrogation system developed was tested in laboratory for high-voltage measurement with temperature variations.

Due to its unique features, the developed system can also be adapted for the monitoring of vibration, such as in the predictive maintenance of motors and turbines, as well as in the monitoring of seismic vibrations. To the best of our knowledge, the interrogation system proposed in this article has not yet been published elsewhere.

The proposed system, its development and testing in laboratory are described in detail in the next sections.

II. FUNDAMENTALS OF FBG

An FBG is formed by periodic modulations of the refractive index in a portion of the optical fiber core written with UV radiation. When a broadband light source (BLS) illuminates this fiber, part of the light is reflected by the FBG with a characteristic spectrum profile centered at λ_B , the Bragg wavelength. Its sensitivity as a function of strain and temperature is given by

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

where ρ_e is the photoelastic coefficient, which is dependent on the material of the fiber core, ϵ_z is the longitudinal mechanical stress applied to the FBG, α is the coefficient of thermal expansion of the fiber and η is the thermo-optical coefficient, which is related to the change in the refractive index of the fiber core by temperature variations. These parameters for a silica optical fiber with a germanium doped core are: $\rho_e = 0.22$, $\alpha = 0.55 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ and $\eta = 8.60 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$. For an FBG centered on $\lambda_B = 1550$ nm, its sensitivity to temperature, after substituting the values of the constants into Equation 1, is 14.18 pm/ $^\circ\text{C}$, and the sensitivity to strain is 1.20 pm/ $\mu\epsilon$ [22].

III. MATERIALS AND METHODS

A. The Twin Grating Interrogation Technique

Several types of FBG-based sensors for measurement of AC signals (voltage and current signals, particularly at 50-60 Hz) have been described in the literature [8], [10]–[12], [14]–[17]. One of the most popular techniques employed in the interrogation of these sensors are based on high-speed interferometry, in which fast-scanning, tunable lasers and tunable Fabry-Perot filters are employed to recover the peak wavelength of the FBG sensor.

However, these techniques are preferred when a broad spectrum has to be covered, particularly when there are many sensors to be interrogated. For instance, commercial interrogators such as the Hyperion si155 (Micron Optics, Inc.), and the SmartScan (Smartfibres Ltd.) have both accuracies in the order of 1 pm, whereas some of the most recent interrogation systems based on the twin-grating technique [10], [15], [25], [26] proposed in the literature may have resolutions in the subpicometer scale. This is of great importance for the accuracy of the measurement system and is perhaps the most important advantage of intensity-modulated, twin-grating-based interrogation schemes. This is explained by the great sensitivity that can be achieved in these interrogation schemes, which are due to the sharpness of the filter-FBG that modulates the optical power reflected by the sensing-FBG. It is important to note, however, that the sharper the edge of the filter-FBG, the shorter is the dynamic range of the sensor. Yet, sensitivity is also dependent on the type of transducer employed in the sensor, e. g., piezoelectric transducers employed for high-voltage sensors [8], [12],

[14]–[16], [27] and transducers made of Terfenol-D employed in current sensors, such as in [11], [17]. Because of their construction, these types of sensors usually present a dynamic range (maximum $\Delta\lambda_B$) of a few tens of picometers of the sensing-FBG, which would result in a poor signal-to-noise ratio (SNR) measurement if read by a 1-pm resolution instrument, not to mention the accuracy and repeatability commonly required.

For these reasons, interrogation systems based on the twin-grating technique are suitable for these types of sensors, because they allow a greater resolution and accuracy, provided that the maximum $\Delta\lambda_B$ of the sensing-FBG stays within the edge of the filter-FBG.

Fig. 1 shows an optical setup of a classic twin-grating interrogation technique.

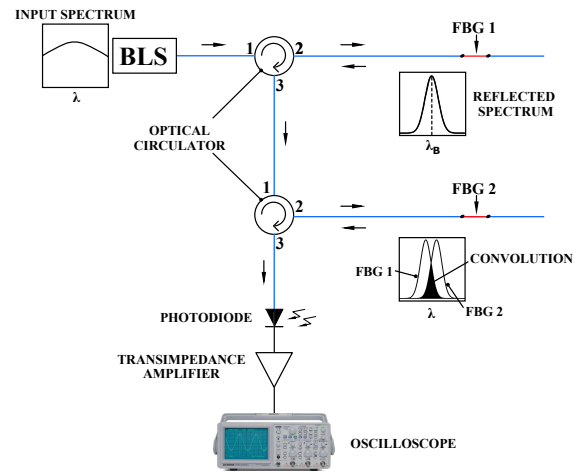


Fig. 1. Optical setup of a classic twin-grating interrogation technique.

The BLS injects light into the fiber and light reaches port 1 of an optical circulator and leaves by port 2. The spectrum reflected by FBG 1 returns to this same port, leaving the circulator by port 3. After that, light enters port 1 of another optical circulator, leaves it by port 2 and, hence, works as a light source to FBG 2. The reflected light from FBG 2 is the intersection of the overlapping area of both FBGs spectra, which can be mathematically described by the convolution between both spectra. The optical signal leaving port 3 is converted into photocurrent by a photodetector. A transimpedance amplifier converts the photocurrent to voltage levels that can be easily read by an oscilloscope or an analog-to-digital converter (ADC). If there is a change in the convolution optical power, it means that there was a relative shift of the FBGs spectra, caused either by strain or temperature, or even both. In case of the need to measure only mechanical strain, temperature variations must be compensated.

B. Interrogation Independent of Temperature Variations

As seen on Equation 1, the Bragg wavelength is sensitive to temperature variations on an FBG. Based on the optical setup of Fig. 1, let FBG 1 be a sensing FBG and FBG 2 be a filter

FBG. In order to compensate for possible temperature shifts on the sensing-FBG, a closed-loop optical power control can be implemented.

Fig. 2 shows that, given the sensing and the filter FBGs spectra (red and blue curves, respectively) at the initial instant $t = t_0$ and at the temperature $T = T_0$, they are superimposed and the black hatched area is the optical power reflected that is guided to the photodetector. Note that AC displacement of the sensing-FBG spectrum due to the high-voltage application leads to the red hatched line.

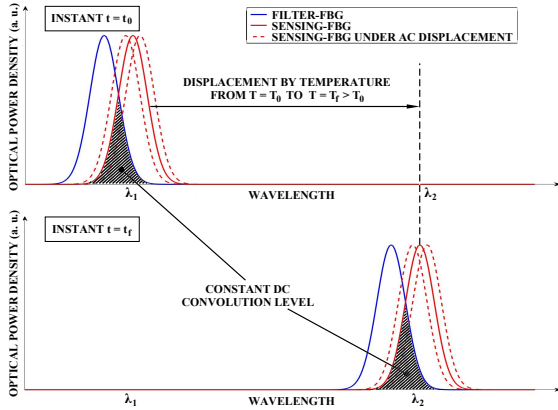


Fig. 2. Graphical representation of the FBGs spectra convolution independent of temperature variations on the sensor.

Suppose that, at the instant $t = t_f$ the center wavelength of the sensing-FBG spectrum is shifted by $\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1$ due to a change on temperature to $T = T_f > T_0$. The main goal of the closed-loop control is to keep the filter-FBG, which is installed over the TEC, tracking the sensing-FBG over low frequency, temperature-induced shifts. This task is performed by a firmware-based routine that reads continuously the DC level of the optical signal acquired by the photodetector and feeds it back to a proportional-integral-derivative (PID) controller that drives the Peltier-effect actuator.

Since temperature variations at these sensors are expected to occur at sub-Hertz basis, the $\Delta\lambda_B$ shifts induced by temperature can be completely separated from the strain-induced, AC (50-60 Hz) $\Delta\lambda_B$ shifts by a simple digital filter [10].

The setpoint of the PID controller is chosen to be the point that keeps the filter-FBG overlapped over the sensing-FBG at an optimal point of operation, which is the point of the convolution plot (see Fig. 3) that allows for the best linearity in the output signal compared to the input one.

The black hatched area of Fig. 2 is the convolution between the FBGs spectra and it is associated to one point of the convolution plot (red curve) on Fig. 3. The blue line means the high-voltage signal read by the sensing-FBG and the black line means the demodulated signal of the power grid.

C. Bragg Gratings and TEC Employed in this Work

The optical setup contains the sensing-FBG and the filter-FBG. In this project, two similar Technica SA FBGs

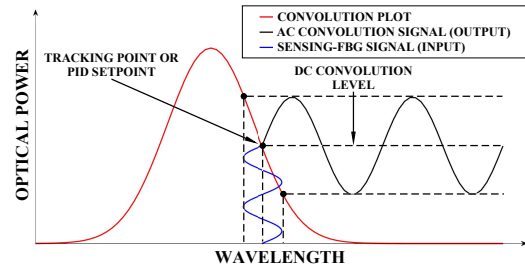


Fig. 3. Convolution plot obtained from the FBGs spectra, the tracking point and typical input and output signals of a sensor.

were used, which specifications given by the manufacturer are: (1530 ± 0.5) nm center wavelength, 2 mm FBG length and reflectivity higher than 50 % of the input power. The reflection spectra from both FBGs were acquired with an optical spectrum analyzer (OSA) Anritsu MS9710C and are shown in Fig. 4.

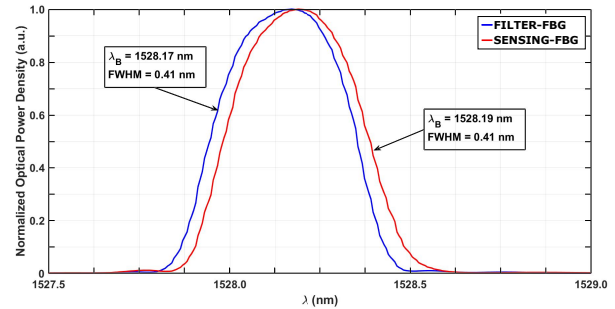


Fig. 4. Normalized twin FBGs reflection spectra experimentally obtained with an OSA, both at 26°C, strain-free.

The thermoelectric actuator employed in this work is a $(15 \times 15 \times 4.3)$ mm TEC manufactured by Adaptive Thermal Management Ltd., model ET-031-10-20. It supports a 2.5 A maximum current and a 3.8 V maximum voltage applied to its terminals. The power generated by this TEC is up to 5.8 W in a maximum of a 75°C temperature shift.

D. The Closed-loop Control

Fig. 5 shows the block diagram of the closed-loop main control routine, which is executed in firmware in an ATmega328P microcontroller.

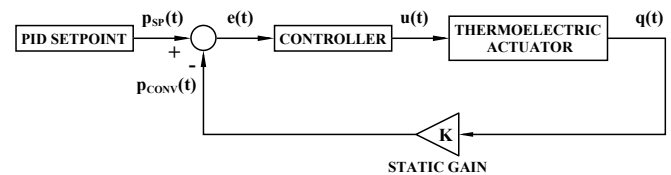


Fig. 5. The closed-loop optical power control.

Programming and debugging of the firmware were performed through an Arduino Uno platform connected to a personal computer (PC).

This figure shows that, after being chosen, the PID setpoint $p_{SP}(t)$ is subtracted by the current convolution power $p_{CONV}(t)$. The result is the error signal $e(t) = p_{SP}(t) - p_{CONV}(t)$ sent to the controller that works to maintain it equal to zero. Based on this algorithm, a control signal $u(t)$ drives the actuator, which provides heat $q(t)$ to vary the center wavelength of the filter-FBG spectrum and that also means a variation on the convolution power. This sequence of variations is modeled by a static gain K related to conversions from temperature to wavelength shifts, and then to optical power $p_{CONV}(t)$ so that $p_{CONV}(t) = K \cdot q(t)$.

E. Overview of the Optical and Electronic Setup

In order to validate the interrogation system proposed, the experimental setup shown in Fig. 6 was assembled in laboratory.

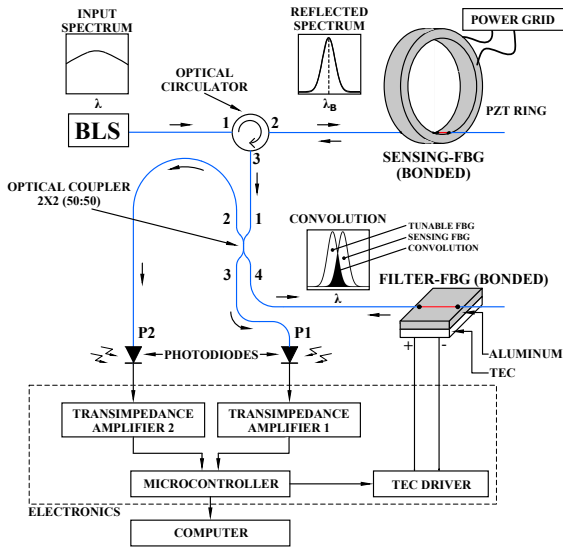


Fig. 6. Optical and electronic setup of the proposed interrogation system.

The sensing-FBG was bonded to the inner surface of a ring-shaped piezoelectric actuator employed as a high-voltage sensor prototype. In order to enhance the wavelength range of the filter-FBG – enhancing the interrogation system temperature compensation capability – it was bonded to the surface of an aluminum plate, which was placed in thermal contact with the surface of the TEC. Fig. 7 shows both FBGs bonded to their respective substrates using an industrial cyanoacrylate adhesive (Loctite 401).

The BLS injects light into the fiber and light reaches port 1 of an optical circulator and leaves by port 2. The spectrum reflected by the sensing-FBG returns to this same port, leaving the circulator by port 3. After that, light reaches port 1 of a 3-dB optical coupler, which splits the light into two beams. As can be seen in Fig. 6, the beam that exits the coupler by port 3 is read by photodiode P1. The beam that exits by port 4 is guided to the filter-FBG located over the TEC and reflected back to the coupler, where it is guided to photodiode P2 through port 2. Transimpedance amplifiers 1 and 2 and

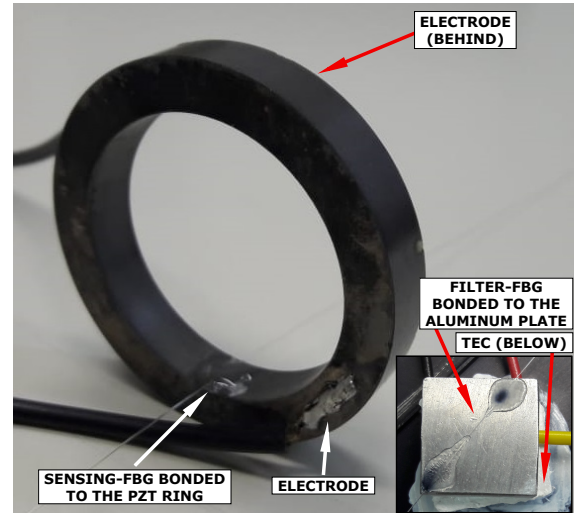


Fig. 7. Sensing-FBG bonded to the inner diameter of a ring-shaped PZT ceramics. Inset: filter-FBG bonded to the surface of an aluminum substrate.

anti-aliasing low-pass filters condition the optical signals from the photodiodes before being digitized by the analog-to-digital converter (ADC) of the microcontroller.

F. Principle of Operation

When the interrogation system is turned on, a subroutine in firmware performs the sweep of the filter-FBG over the maximum temperature range possible by acting on the TEC, from 2 °C to 70 °C. The main goal of this subroutine is to acquire the entire convolution plot between the reflection spectra of both FBGs, in order to check if the sensing-FBG is initially within the limits of operation of the filter-FBG, as well as to determine the optimal point of operation of the system (the point in which the output signal presents the least distortion compared to the input signal, see [10], [14]).

After the convolution plot is completely acquired, the main control routine executes a PID control, which main goal is to keep the filter-FBG tracking the sensing-FBG over slow, temperature-induced shifts, maintaining the average value of the convolution signal fixed. In this way, the wavelength separation between both FBGs ($\Delta\lambda_B = |\lambda_{B\text{sensingFBG}} - \lambda_{B\text{filterFBG}}|$) remains constant, regardless of the temperature of the sensor. Therefore, the proposed interrogation technique allows a temperature-independent measurement of the AC signal from the sensing-FBG without the need of a temperature sensor, which is an advantage over passive temperature compensating interrogation techniques.

The filter FBG is bonded to the top of the aluminum plate in such a way that its sensitivity to temperature is about 38 pm/°C, which is approximately three times the sensitivity of the bare FBG. This is also an advantage of the proposed system over the one in [10], because a higher sensitivity of the filter-FBG allows a larger range of temperature compensation.

As shown in Fig. 6, part of the optical power reflected directly by the sensing-FBG is also guided through port 3 of the 3-dB optical coupler and is continuously monitored

by photodiode P1 in order to compensate for optical power fluctuations of the BLS. The compensation is performed by a normalization between the digital values read from photodiodes P1 and P2, within the main control routine.

IV. RESULTS AND DISCUSSION

A. Implementation and Tests of the Main Control Routine

In order to perform a preliminary test of the interrogation system, the experimental setup shown in Fig. 6 was assembled. The setpoint $p_{SP}(t)$ was previously set in firmware, then a first run of the main control routine was performed after the system had been turned on. The error $e(t)$ and the control $u(t)$ signals are calculated and employed to drive the TEC through a pulse-width-modulated (PWM) driver implemented with a full H-bridge, whose analog input is also provided by the microcontroller.

At every cycle of the control loop of Fig. 5, the analog signal from transimpedance amplifier 2 is sampled and digitized, and the digital filter inside the main control routine separates its AC and DC components. The DC component is stored in the $p_{CONV}(t)$ corresponding variable and applied into the control loop.

Fig. 8 shows a time-record plot of the main control routine starting when the electronic system is turned on.

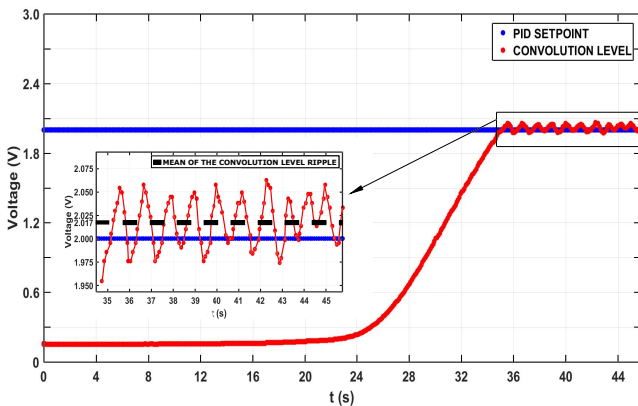


Fig. 8. Graph showing the controlled variable $p_{CONV}(t)$ reaching the PID setpoint $p_{SP}(t) = 2.0$ V proving the proper work of the controller.

It is possible to see in Fig. 8 that the value of $p_{CONV}(t)$ (red curve) is near zero at the beginning, which means that the reflection peak of the filter-FBG is not even partially overlapped to the peak of the sensing-FBG. As the filter-FBG is heated, its spectrum shifts to the right and starts to overlap the reflection peak of the sensing-FBG, which causes $p_{CONV}(t)$ to rise to the optimal point of operation, which is set by $p_{SP}(t)$ (blue line). It can also be seen that, within half a minute, the main control routine is running and keeping the filter-FBG tracking the sensing-FBG over slow, temperature-induced Bragg wavelength shifts. Thus, the controller guarantees the maintenance of $e(t) \sim 0$, which means that both FBGs are partially overlapped at the desired condition, as expected for a functional electronic controller.

At the steady-state, the convolution level ripples around the PID setpoint because of the noise and inherent characteristics of the optical and electronic components of the interrogation system. In the inset graph of Fig. 8, it can be seen the referred ripple, meaning the PID controller actuating to keep the filter-FBG tracking the sensing-FBG over time. It is also possible to see that the control maintains the convolution DC level (overlap between both FBGs) within ~ 100 mV, that is approximately equivalent to 5×10^{-3} pm, which is a great achievement for a low-cost interrogation system.

B. Temperature-Compensated Voltage Measurements

An experiment was conducted to evaluate the convolution DC level of both FBGs spectra at different temperature conditions on the sensor prototype. In order to characterize the proposed interrogation system in measurements of AC signals, a prototype of high-voltage sensor was assembled. It consists of a ring-shaped piezoelectric actuator (PZT-4, $d33 = 300$ pm/V, Sparkler Piezoceramics Pvt Ltd) that was immersed in a small vat filled with dielectric oil that can be heated by a temperature-controlled equipment. The prototype with the sensing-FBG bonded to it was heated inside the oil bath up to 50 °C with no voltage signal applied to it. Then, the vat was placed on a workbench for the tests with AC voltage signals up to 600 Vrms. Thus, voltage measurements were performed with the high-voltage prototype cooling down from 47.7 °C to room temperature, around 29.7 °C.

For this experiment, the input voltage signal was generated by a voltage transformer (VT) connected to a variable transformer (variac), which was connected to the laboratory main supply (127 Vrms, 60 Hz), and the voltage was applied to the prototype.

It is important to note that it is out of the scope of this work the implementation of an actual optical high-voltage sensor with all its necessary features. Thus, the high-voltage sensor prototype described in this work was assembled only for preliminary tests of the interrogation system and to test its performance during AC voltage measurements, independent of temperature variations at the sensing point.

Fig. 9 shows the stability of the DC level of convolution acquired during the temperature variation of the high-voltage sensor prototype.

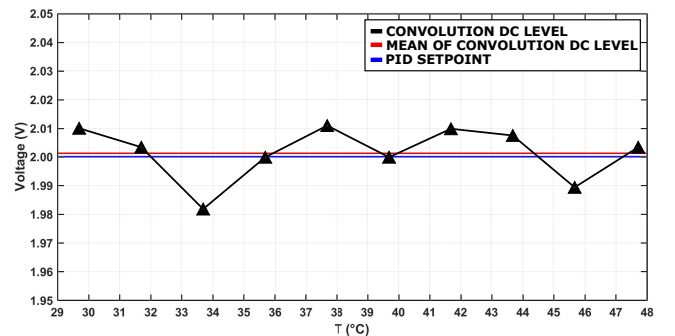
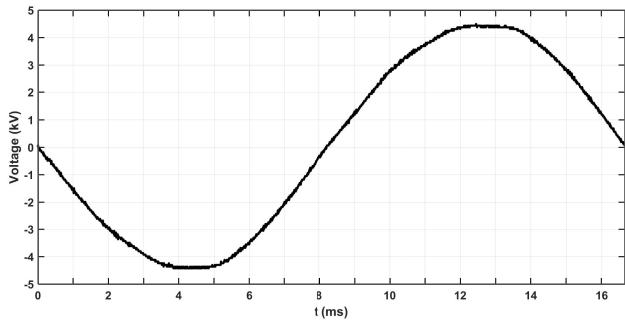


Fig. 9. Temperature compensation performed by the developed interrogation system.

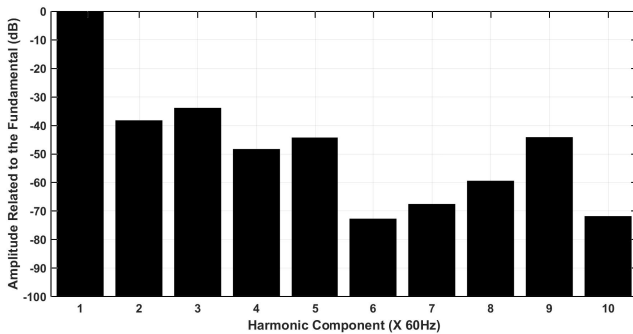
Temperature measurements were performed with a type-K thermocouple submerged in the same vat containing the oil and the high-voltage sensor prototype. It can be seen that the maximum deviation of the experimental data points from the PID setpoint (horizontal blue line at 2 V) is 30 mV, which denotes the high stability achieved by the control implemented. The red line in the plot represents the mean value of the experimental data and it stays at 2.0012 V, which means an error of 0.06% of the desired setpoint.

It is important to notice that the tracking of the sensing-FBG by the filter-FBG is dependent on the rate of temperature changes at the sensor. The slower the temperature variations, the better is the control because of the latency of the PID controller.

While performing the temperature compensation, the interrogation system also acquires de AC optical signal, which is separated from the DC level by the digital filter. Figs. 10(a) and 10(b) show one cycle of the input high-voltage signal applied to the electrodes of the voltage sensor prototype and its fast Fourier transform (FFT), respectively.



(a)

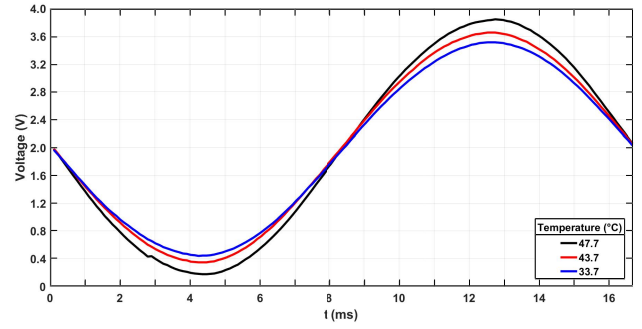


(b)

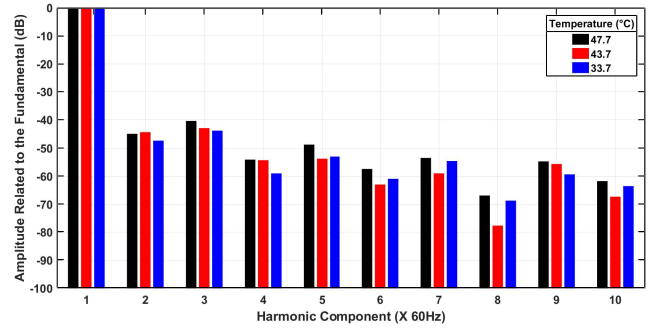
Fig. 10. The power grid AC voltage signal (a) and its FFT (b).

For a comparison between the input and output signals and the characterization of the interrogation system, Figs. 11(a) and 11(b) show three one-cycle acquisitions of the output signal and their FFT, respectively. These signals were acquired with the sensor prototype in three different temperatures, 33.7 °C, 43.7 °C, and 47.7 °C.

A comparison between the FFT levels shown in Figs. 10(b) and 11(b) allows us to conclude that the spectral composition of the output signals are well correlated to that of the input signal. This result is of great importance because it shows



(a)



(b)

Fig. 11. Output signals acquired from the developed interrogation system in three different temperatures measured at the sensing point (a) and their FFTs (b).

that the developed interrogation system is capable of AC measurements independent of temperature variations at the sensing point. Furthermore, the developed interrogation system eliminates the need for a temperature sensor.

It is possible to see in Fig. 11(a), however, that there is a slight difference in the amplitudes of the output signals obtained at the three different temperatures, although the input signal is the same for each one. This result means that different sensitivities have been observed for each temperature, which can be explained by a change in the behavior of the adhesive employed for bonding the sensing-FBG.

Nevertheless, it is important to notice that the change in sensitivity observed is related to the prototype of voltage sensor employed, not to the interrogation system.

V. CONCLUSION

In this work, a closed-loop optoelectronic interrogation system for FBG sensors was built and tested. Primarily intended for the interrogation of sensors applied to the measurement of strain-induced physical variables in the AC-frequency range (50-60Hz), the proposed system is based on a twin-grating interrogation technique that is independent of temperature variations. The developed interrogation system was tested in laboratory with a prototype of high-voltage sensor under a temperature variation of more than 20 °C with a very good stability of the output signals, showing that it is capable of keeping the filter-FBG tracking the sensing-FBG.

One of the advantages of the proposed system is that it does not perform a temperature compensation using a temperature sensor at the sensing point, such as done by Ribeiro *et al.* [14]. Instead, the developed system relies on the measurement of the optical convolution signal between the reflection spectra of two FBGs (a sensing FBG and a filter FBG). Provided that temperature variations at the sensing area occur at a much lower rate than the strain applied to the sensing-FBG – which is true for most environments – thermal effects can be easily separated from the strain by digital filtering of the convolution signal [10]. Then, a closed-loop control is employed to maintain the filter-FBG tracking the sensing-FBG over low-frequency temperature variations, while the high-frequency, strain-induced wavelength shifts ($\Delta\lambda_B$) are measured accurately at the best point of linearity available, given the particular reflection spectra of both FBGs employed. Furthermore, since a Peltier-effect thermoelectric cooler (TEC) is employed as a low-cost actuator coupled to the filter-FBG, the proposed system is easily expandable for monitoring an array of sensing-FBGs.

The experimental results showed that the closed-loop control is capable of maintaining the filter-FBG within a $\Delta\lambda$ of 5×10^{-3} pm. This is an important result, since the stability of the tracking point is directly related to the level of distortion at the output signal.

Furthermore, an important feature of the developed system is that it is considerably more robust than passive twin-grating interrogation systems in which the filter-FBG is simply put on the same environment of the sensing-FBG in order to track its peak wavelength. This can be explained by the fact that an active, closed-loop controlled system allows the system to operate at the lower level of distortion based on the best linearity portion available of the filter-FBG spectrum.

Future developments of the proposed interrogation system include the improvement of the resolution of the ADC employed, which will allow for improvements in the control and in the measurements accordingly. Another important improvement is related to the refinement of the PID control, which will also improve the stability for tracking the setpoint, reducing the distortion at the output signal and improving the SNR of the measurement system.

The developed interrogation system is currently being employed with a 13.8 kV class optical voltage transformer under deployment for experimental tests in real operating conditions and the results of the complete measurement system will be the subject of another article.

REFERENCES

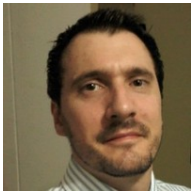
- [1] B. Lee, Review of the present status of optical fiber sensors, *Optical Fiber Technology*, v. 9, pp. 57-79, 2003.
- [2] D. Ahuja and D. Parande, Optical sensors and their applications, *Journal of Scientific Research and Reviews*, v. 1, n. 5, pp. 060-068, 2012.
- [3] M. I. Zibaii, H. Latifi, F. Karami, A. Ronaghi, S. C. Nejad and L. Dargahi, In vivo brain temperature measurements based on fiber optic Bragg grating, *25th Optical Fiber Sensors Conference (OFS)*, pp. 1-4, 2017.
- [4] K. O. Hill, Y. Fujii, D. C. Johnson et al., Photosensitivity in optical fiber waveguides: Application to reflection filter fabrication, *Applied Physics Letters*, v. 32, n. 10, pp. 647-649, 1978.
- [5] L. Wang, N. Fang, F. Ding and Z. Huang, Simultaneous measurements of vibration, temperature and humidity using SOA-based fiber Bragg grating laser, *Asia Communications and Photonics Conference and Exhibition*, pp. 304-305, 2010.
- [6] Kuo Li, Review of the strain modulation methods used in fiber Bragg grating sensors, *Journal of Sensors*, v. 2016, 2016.
- [7] Q. Yang, Y. He, S. Sun, M. Luo, and R. Han, An optical fiber Bragg grating and piezoelectric ceramic voltage sensor, *Review of Scientific Instruments*, v. 88, n. 10, 2017.
- [8] G. Fusiek, J. Nelson, P. Niewczas, J. Havunen, E. P. Suomalainen, and J. Hallstrom, Optical voltage sensor for MV networks, in *Proceedings of IEEE Sensors*, v. 2017-december, pp. 1-3, 2017.
- [9] B. Sarkar, D. K. Mishra, C. Koley, N. K. Roy, and P. Biswas, Intensity-modulated fiber Bragg grating sensor for detection of partial discharges inside high-voltage apparatus, *IEEE Sensors Journal*, v. 16, n. 22, pp. 79507957, 2016.
- [10] A. Dante, R. M. Bacurau, A. W. Spengler, E. C. Ferreira and J. A. S. Dias, A temperature-independent interrogation technique for FBG sensors using monolithic multilayer piezoelectric actuators, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, v. 65, n. 11, pp. 2476-2484, 2016.
- [11] F. V. B. Nazaré and M. M. Werneck, Compact optomagnetic Bragg-grating-based current sensor for transmission lines, *IEEE Sensors Journal*, v. 15, n. 1, pp. 100-109, 2015.
- [12] G. Fusiek and P. Niewczas, Laboratory investigation of an intensimetric dual FBG-based hybrid voltage sensor, *24th International Conference on Optical Fibre Sensors*, v. 9634, pp. H1-H4, 2015.
- [13] Y. Yao, C. Zhou, W. Zhang, Q. Xue, and Y. Ling, A fiber Bragg grating direct current sensor with temperature compensation based on electromagnetic force, *Advances in Mechanical Engineering*, v. 7, n. 3, 2015.
- [14] B. A. Ribeiro, M. M. Werneck, F. V. B. Nazaré and M. N. Gonçalves, A Bragg grating tunable filter based on temperature control system to demodulate a voltage sensor, *24th International Conference on Optical Fiber Sensors*, v. 9634, pp. 963444-1-963444-4, 2015.
- [15] G. Fusiek, P. Orr, and P. Niewczas, Temperature-independent high-speed distributed voltage measurement using intensimetric FBG interrogation, *IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC)*, v. 1, n. 2015, pp. 14301433, 2015.
- [16] B. A. Ribeiro, M. M. Werneck and J. L. da Silva Neto, Novel optimization algorithm to demodulate a PZT-FBG sensor in AC high voltage measurements, *IEEE Sensor Journal*, v. 13, n. 4, pp. 1259-1264, 2013.
- [17] A. O. Cremonesi, E. C. Ferreira, A. J. B. Filho, and J. A. S. Dias, A fiber bragg grating RMS current transducer based on the magnetostriction effect using a terfenol-D toroidal-shaped modulator, *IEEE Sensors Journal*, v. 13, n. 2, pp. 683-690, 2013.
- [18] U. Tiwari, K. Thyagarajan, M. R. Shenoy, and S. C. Jain, EDF-Based edge-filter interrogation scheme for FBG sensors, *IEEE Sensors Journal*, v. 13, n. 4, pp. 1315-1319, 2013.
- [19] M. Perry, P. Orr, P. Niewczas, and M. Johnston, High-Speed interferometric FBG interrogator with dynamic and absolute wavelength measurement capability, *Journal of Lightwave Technology*, v. 31, n. 17, pp. 2897-2903, 2013.
- [20] F. W. D. Pfrimer, M. H. Koyama, E. C. Ferreira and A. S. Dias, Closed-loop interrogation techniques for temperature measurement using fibre Bragg gratings, *Proceedings of the International Conference on Photonics, Optics and Laser Technology*, pp. 3539, 2013.
- [21] F. W. D. Pfrimer, M. Koyama, A. Dante, E. C. Ferreira and J. A. S. Dias, A closed-loop interrogation technique for multi-point temperature measurement using fiber Bragg gratings, *Journal of Lightwave Technology*, v. 32, n. 5, pp. 971-977, 2014.
- [22] R. Kashyap, *Fiber Bragg Gratings*, 2nd ed. Burlington, MA: Academic Press, 2010.
- [23] Khode, Swapnil S., Pratik Kale and Chandrakant Gandhile, Review on Application of Thermoelectric Peltier Module in cooling and power generating Technology, *International Journal of Engineering and Technical Research*, ISSN: 2321-0869, 2015.
- [24] Patil, P. J., and A. Patil, Review on Thermoelectric Devices, *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, v. 3, n. 10, pp. 681-688, 2013.
- [25] L. A. Ferreira, J. L. Santos and F. Farahi, Pseudoheterodyne demodulation technique for fiber Bragg grating sensors using two matched gratings, *IEEE Photonics Technology Letters*, v. 9, n. 4, pp. 487-489, 1997.
- [26] D. A. Jackson, A. B. Lobo Ribeiro, L. Reekie and J. L. Archambault, Simple multiplexing scheme for a fiber-optic grating sensor network, *Optics Letters*, v. 18, n. 14, pp. 1192-1194, 1993.

- [27] Allil, Regina Célia da Silva Barros and Werneck, Marcelo Martins, Optical high-voltage sensor based on fiber Bragg grating and PZT piezoelectric ceramics, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, v. 60, n. 6, pp. 2118-2125, 2011.



Gustavo Marques Mattos was born in Rio de Janeiro, Brazil, in 1987. He received the B.Sc. degree in control and automation engineering from the Federal University of Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brazil, in 2015, where he is currently pursuing the M.Sc. degree with the Electrical Engineering Program.

He is presently a Researcher with the Instrumentation and Photonics Laboratory, Electrical Engineering Program, Federal University of Rio de Janeiro. His current research interests include fiber optics, sensors, transducers and instrumentation.



Alex Dante was born in Limeira, Brazil, in 1979. He received the B.Sc. degree in physics (2009), and the M.Sc. (2012) and D.Sc. (2016) degrees in electrical engineering from the University of Campinas (UNICAMP), Campinas, Brazil. He is currently working as a postdoctoral researcher at Instrumentation and Photonics Laboratory at Federal University of Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro, Brazil. His current research interests include fiber optic sensors, interrogation techniques, and electronic instrumentation.



Regina Célia da Silva Barros Allil was born in Rio de Janeiro, Brazil. She received the B.Sc. degree in electronic engineering from the Faculdade Nuno Lisboa, Rio de Janeiro, in 1988, the M.Sc. degree from the Biomedical Engineering Program, Federal University of Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, in 2004, and the Ph.D. degree from the Electrical Engineering Program, Federal University of Rio de Janeiro, in 2010.

She is currently a Researcher with the Biological Defense Laboratory, Brazilian Army Technology Center (CTEx), Rio de Janeiro. She is also a Collaborator with the Instrumentation and Photonics Laboratory, Electrical Engineering Program, Federal University of Rio de Janeiro. Her research interests include fiber optic sensors and infrared night vision systems.



Cesar Cosenza de Carvalho was born in Rio de Janeiro, Brazil, in 1966. He received the B.Sc., M.Sc., and D.Sc. degrees in electronic engineering from the Federal University of Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro, in 1989, 1994, and 2000, respectively. He is currently a Researcher with the Instrumentation and Photonics Laboratory, Electrical Engineering Program, UFRJ. His research interests include fiber optics, sensors, transducers, and optoelectronic instrumentation.



Marcelo Martins Werneck was born in Petrópolis, Brazil. He received the degree in electronic engineering from the Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brazil, in 1975, the M.Sc. degree from the Biomedical Engineering Program, Federal University of Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro, in 1977, and the Ph.D. degree from the University of Sussex, Brighton, U.K., in 1985.

Since 1978, he has been with UFRJ, where he is currently a Lecturer, Researcher and the Coordinator of the Instrumentation and Photonics Laboratory, Electrical Engineering Program. His research interests include fiber optics, sensors, transducers and instrumentation.