UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Maurino de Febbo

Método de interrogação de fibra óptica
para detecção de intrusão

São Carlos
2016

MAURINO DE FEBBO

**Método de interrogação de fibra óptica
para detecção de intrusão**

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências.

Área de Concentração: Dinâmica de Máquinas e Sistemas

Orientador: Prof. Dr. Daniel Varela Magalhães

ESTE EXEMPLAR TRATA-SE DA
VERSÃO CORRIGIDA.
A VERSÃO ORIGINAL ENCONTRA-
SE DISPONÍVEL JUNTO AO
DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA MECANICA DA
EESC-USP.

São Carlos
2016

Autorizo a reprodução total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

D313m De Febbo, Maurino
Método de interrogação de fibra óptica para
detecção de intrusão / Maurino De Febbo; orientador
Daniel Varela Magalhães. São Carlos, 2016.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Mecânica e Área de Concentração em
Dinâmica de Máquinas e Sistemas -- Escola de Engenharia
de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2016.

1. Detecção de Intrusão . 2. Sensor distribuído.
3. Sensor Brillouin. 4. BOTDA. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **MAURINO DE FEBBO**.

Título da dissertação: "Método de interrogação de fibra óptica para detecção de intrusão".

Data da defesa: 24/06/2016

Comissão Julgadora:

Resultado:

Prof. Dr. **Daniel Varela Magalhães**
(Orientador)
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

APROVADO

Prof. Dr. **Sergio Ricardo Muniz**
(Instituto de Física de São Carlos/IFSC)

Aprovado

Prof. Dr. **Robson Barcellos**
(Universidade Federal de São Carlos/UFSCar)

APROVADO

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica:
Prof. Associado **Gherhardt Ribatski**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:
Prof. Associado **Luís Fernando Costa Alberto**

AGRADECIMENTOS

À Deus, por continuar me presenteando com energia e motivação para prosseguir com a minha carreira, e por permitir a conquista de mais este objetivo.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Daniel Varela Magalhães, pelo total apoio, confiança e paciência, assim como pelos valiosos ensinamentos e exemplos que foram transmitidos, sempre com grande competência e num clima de convivência extremamente saudável e ético. Sem esta disposição de estar sempre pronto a ajudar e colaborar, certamente o trabalho não teria sido possível.

À grande equipe de profissionais da USP São Carlos, pela calorosa acolhida e pela oportunidade de realização do programa de mestrado.

A todos os professores com quem tive a felicidade de estudar e conviver durante a realização do programa, inclusive de outras instituições, pelo extremo profissionalismo e carinho com que desempenharam o seu papel.

Ao Prof. Dr. Flavio Caldas da Cruz, da UNICAMP, por disponibilizar as instalações do seu laboratório e por nos emprestar alguns equipamentos essenciais à pesquisa.

Aos então Mestrandos Erick Abraham Lamilla Rubio e Jose Luis Saquinaula Brito (UNICAMP), pela inestimável ajuda e apoio no uso do laboratório.

À Prysmian Fibras Óticas Brasil Ltda – Sorocaba - SP, pela importante contribuição, cedendo graciosamente 4,945 km de fibra óptica para uso nesta pesquisa.

Ao Centro de Tecnologia da Informação, CETI-SC, por colocar à disposição os seus recursos e, especialmente, aos Técnicos Felipe Beloto e Luiz Alberto Botega, que nos assistiram com a conectorização e teste dos componentes ópticos.

Aos Prof. Dra. Mônica de Lacerda Rocha e Dr. Ben-Hur Borges, do Departamento de Engenharia Elétrica da EESC-USP, por gentilmente nos emprestar alguns instrumentos e itens de seu laboratório para uso no experimento.

Ao Prof. Dr. Philippe Wilhelm Courteille, do IFSC-USP – São Carlos, por gentilmente nos ceder um espaço no seu laboratório para realização do experimento.

Aos profissionais da Secretaria de pós-graduação da Eng. Mecânica, do LIEPO, e demais colegas da USP, que estiveram sempre prontos a nos apoiar.

À bibliotecária Elena Palloni, pela valiosa ajuda na revisão deste documento.

À todos os familiares e amigos que souberam compreender as minhas ausências durante o transcurso dessa jornada.

RESUMO

DE FEBBO, M. **Método de Interrogação de fibra óptica para detecção de intrusão**. 2016. 92f. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.

Neste trabalho é proposto um método de interrogação de fibra óptica com arquitetura reduzida, que pode ser empregado em sistemas distribuídos de detecção de intrusão de médias e longas distâncias, como para proteção de perímetros, divisas, faixa de dutos, plantas industriais, ou outras instalações, usando uma fibra óptica comum como elemento sensor. O método é baseado na técnica Brillouin Optical Time Domain Analysis (BOTDA), porém dispensando-se a varredura sequencial com diferentes frequências, o que simplifica o sistema, reduz custos e melhora o tempo de resposta. O trabalho consiste de uma abordagem geral sobre o tema, sendo apresentada a teoria básica dos fenômenos de espalhamento não linear em fibras ópticas, o detalhamento do método de interrogação proposto e a descrição dos experimentos realizados em laboratório, seguida de uma análise e comentários quanto ao desempenho alcançado, bem como de algumas sugestões para melhor explorar o potencial do método.

Palavras-chave: Detecção de Intrusão. Sensor distribuído. Sensor Brillouin. BOTDA.

ABSTRACT

DE FEBBO, M. **Optic fiber interrogation method for intrusion detection**. 2016. 92f. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.

In this research work is proposed an optic fiber interrogation method with reduced architecture, that can be applied in distributed intrusion detection systems of medium and long distances, such as for the protection of pipeline's right of way, perimeters, boundaries, industrial plants or others installations, using a standard optic fiber as a sensor. The proposed method is based on a Brillouin Time Domain Analysis (BOTDA), however dispensing the sequential frequency sweeping, what simplifies the system, reduce its costs and improve the response time. The work comprehends a general discussion of the subject, being presented the basic theory of the nonlinear scattering phenomena in optic fibers, the description of the proposed interrogation method and the conducted in lab experiments, followed by an analysis and comments on the achieved performance, as well as a few suggestions to better explore the potential of the method.

Keywords: Intrusion detection. Distributed sensing. Brillouin sensor. BOTDA.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AM-DSB	Amplitude Modulation with Double Sideband
BLMS	Brillouin-Mandelstam Light Scattering.
BLS	Brillouin Light Scattering
BMS	Brillouin-Mandelstam Scattering
BOCDA	Brillouin Optical Correlationn Domain Analysis
BOFDA	Brillouin Optical Frequency Domain Analysis
BOTDA	Brillouin Optical Time Domain Analysis
BOTDR	Brillouin Optical Time Domain Reflectometry
COTDR	Coherent Time Domain Reflectometry
CW	Continuous Wave
DC	Direct Current
DAS	Distributed Acoustic System
DP-BOTDA	Dark Pulse Brillouin Optical Time Domain Analysis
DSTS	Distributed Strain and Temperature Sensing
DTS	Distributed Temperature Sensing
EDFA	Erbium Doped Fiber Amplifier
EOM	Electro-Optic Modulator
FBG	Fiber Bragg Grating
FD	Fotodetector
LSB	Lower Sideband
ODTR	Optical Time Domain Reflectometry
PI	Proporcional + Integral
PLL	Phase Locked Loop
SBS	Stimulated Brillouin Scattering
SHF	Super High Frequency
SRS	Stimulated Raman Scattering
SSMF	Standard Single Mode Fiber
USB	Upper Sideband

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	Considerações sobre o tema	17
1.2	Objetivos	18
1.3	Organização do Trabalho	19
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	21
2.1	Introdução	21
2.2	Espalhamentos Não Lineares Em Fibras Ópticas	21
2.3	Espalhamento Brillouin Estimulado (SBS).....	24
2.3.1	Teoria básica do SBS	24
2.3.2	Espectro do Ganho Brillouin	28
2.3.3	Potência crítica Brillouin	30
2.4	Aplicações do fenômeno SBS	34
3	METODOLOGIA.....	37
3.1	Técnicas De Sensoriamento Distribuído.....	37
3.1.1	Técnica BOTDR.....	39
3.1.2	Técnica BOTDA.....	40
3.1.3	Outras metodologias.....	41
3.2	Arquitetura do Interrogador	42
3.2.1	Critérios de projeto	42
3.2.2	Descrição do arranjo.....	42
3.2.3	Funcionamento do interrogador.....	45
3.3	Medições	49
3.3.1	Arranjo experimental.....	49
3.3.2	Descrição dos módulos e componentes.....	50
3.3.3	Instrumentos e Recursos	55
3.3.4	Espectro do ganho Brillouin.....	56
3.3.5	Limiar de Espalhamento Estimulado.....	58
3.3.6	Simulações de intrusão	60
3.3.7	Aquisição de dados.....	62
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	67
4.1	Comentários	67

4.2	Detecção das intrusões simuladas	67
4.3	Sensibilidade de detecção	71
4.4	Localização dos eventos	74
4.5	Tempo de detecção.....	75
4.6	Considerações sobre Interferências térmicas.....	76
5	CONCLUSÕES	77
5.1	Desempenho do método	77
5.2	Sugestões para futuros trabalhos	77
	REFERÊNCIAS	79
	APÊNDICE A - Detalhes construtivos dos módulos e da giga de testes	81

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações sobre o tema

Sensores de intrusão distribuídos desempenham um papel cada vez mais importante na proteção de perímetros, divisas, faixas de dutos e outras aplicações, substituindo com vantagens os sensores discretos, que seriam requeridos em enorme quantidade para proteção de grandes distâncias. Diversas soluções de monitoramento têm sido empregados para este propósito, como, sensores magnéticos enterrados, cabos coaxiais radiantes, barreiras de luz e outras, porém com muitas limitações. Os sensores magnéticos e cabos coaxiais radiantes sofrem de um grande problema que é a sensibilidade a interferências eletromagnéticas e, portanto, não podem ser utilizados em muitas das aplicações atuais onde quase sempre há a presença de campos interferentes. As barreiras de luz são delicadas e requerem constante limpeza e manutenção (LEUNG; CHANG; SI-HSU, 1986). Sensores baseados em fibra óptica são imunes a este tipo de interferência porém, nas suas primeiras implementações apresentavam outras limitações. Numa delas o sistema se baseava na detecção da ruptura da fibra, o que supostamente aconteceria numa tentativa de intrusão, condição que nem sempre é assegurada devido à limitações construtivas ou de instalação. Outra versão funcionava baseada na detecção de mudanças na polarização da luz em função de dobras mais abruptas na fibra. Este segundo tipo utiliza fibras ópticas multimodo e a sua aplicação limita-se a pequenas distâncias, da ordem de alguns metros (KWON et al., 2002).

Ainda nos anos 70 foi introduzido um método de avaliação da atenuação em fibras ópticas, baseado na técnica Optical Time Domain Reflectometry (OTDR), fazendo uso do espalhamento Rayleigh (BARNOSKI; JENSEN, 1976; BARNOSKI et al., 1977). Mais tarde, Dakin (1993) sugeriu o uso do OTDR como um sensor distribuído. Como o espalhamento Rayleigh não é associado a deslocamentos de frequência, um evento de intrusão suficientemente intenso pode mascarar as reflexões de pontos mais distantes do sensor, impossibilitando a detecção de outros eventos que ocorram ao mesmo tempo, sendo uma desvantagem deste método. Nas

décadas recentes foram conduzidas numerosas pesquisas sobre o assunto, tendo sido introduzidos muitos aprimoramentos e novas técnicas de sensoriamento distribuído baseadas no efeito de Espalhamento Brillouin Estimulado (SBS), que contornaram totalmente estes problemas, favorecendo o uso de fibras óticas como sensor distribuído (BAO; CHEN, 2011). O método de interrogação apresentado é baseado na técnica Brillouin Optical Time Domain Analysis (BOTDA), e permite cobrir distâncias de dezenas de quilômetros com uso de um único interrogador, tendo capacidade para detecção e localização de eventos simultâneos.

Apesar de não se tratar de um assunto recente, o Brasil continua muito atrasado e totalmente dependente de importações quando nos referimos a este tipo de tecnologia. Além do aspecto da evasão de divisas, o alto custo dos equipamentos, somado à forte carga de impostos praticada no país, torna as aplicações economicamente inviáveis na grande maioria dos casos. O desenvolvimento de um método de interrogação simplificado e de menor custo, pode ser o primeiro passo para viabilizar a produção de alternativas nacionais de sistemas distribuídos de detecção de intrusão baseados em fibra óptica. Esta foi a principal motivação para a escolha deste tema.

1.2 Objetivos

Este trabalho de pesquisa tem como primeiro objetivo a condução de experimentos com um método de interrogação de fibra óptica de arquitetura reduzida, mais rápido e menos dispendioso que os sistemas tradicionais, que possa ser aproveitado como um sistema distribuído de detecção de intrusão, empregando uma fibra óptica monomodo comum como elemento sensor. Outro importante objetivo é o de desenvolver capacitações nesta área de tecnologia, e assim contribuir de alguma maneira para o preenchimento da lacuna existente na indústria nacional, que ainda não oferece soluções para este tipo de aplicação. Não se pretende esgotar as investigações sobre o tema, que é muito vasto, nem discorrer sobre todas as técnicas de sensoriamento distribuído existentes atualmente, mas sim propor uma versão sintética desses métodos e avaliar o seu comportamento em ambiente de laboratório.

Por tratar-se de um assunto fascinante e que tem sido bastante abordado nas décadas recentes, há também um grande interesse no aprendizado do assunto, dado a sua relevância para o pesquisador tanto em termos científicos como em termos tecnológicos. Os estudos conduzidos nesta pesquisa certamente servirão como base e estímulo para o desenvolvimento de futuros trabalhos e investigações.

1.3 Organização do Trabalho

Esta dissertação se encontra organizada em capítulos e os assuntos estão divididos conforme abaixo:

Capítulo 2: FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA - Neste capítulo são abordados os principais fenômenos de espalhamento em fibras ópticas, a teoria básica envolvida e as suas principais aplicações em sistemas de sensoriamento distribuído.

Capítulo 3: METODOLOGIA - Neste capítulo são descritas as principais fases do experimento, descrevendo as técnicas de sensoriamento distribuído mais relevantes, com uso de fibras ópticas, o método de interrogação desenvolvido, o arranjo experimental e as medições realizadas em laboratório.

Capítulo 4: RESULTADOS E DISCUSSÕES - Neste capítulo é feita a análise dos dados coletados nos diversos experimentos, sendo apresentados os resultados e discutidos os aspectos relacionados ao desempenho do método.

Capítulo 5: CONCLUSÕES - Neste capítulo são apresentadas as conclusões obtidas a partir do trabalho de pesquisa realizado, e algumas sugestões para futuros trabalhos.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Introdução

Sensores de fibra óptica são ferramentas ideais para monitoramento distribuído de grandezas físicas como, temperatura, deformação, deslocamento, vibração e outras, sendo possível cobrir distâncias de dezenas de quilômetros com uso de uma única fibra e de um único equipamento de leitura (interrogador). Oferecem boa resolução espacial e boa sensibilidade de detecção, e podem ser aplicados com vantagens em sistemas de segurança, vigilância, no monitoramento de estruturas civis e outras. A maioria dos sistemas existentes é baseada no efeito de Espalhamento Brillouin Estimulado (SBS). Diversas técnicas tem sido criadas para tirar proveito deste importante fenômeno de espalhamento, sendo de maior interesse a técnica Brillouin Optical Time Domain Analysis (BOTDA), na qual foi baseado o projeto do método.

Neste capítulo são apresentados os conceitos e a teoria básica envolvida nos principais processos de espalhamento que ocorrem em fibras ópticas, com foco no Espalhamento Brillouin Estimulado (SBS), por ser de maior relevância para o trabalho de pesquisa.

2.2 Espalhamentos Não Lineares Em Fibras Ópticas

Os fenômenos de espalhamento ocorrem em meios transparentes e resultam da interação da luz com as flutuações nas propriedades ópticas do material no qual se propaga, tais como, flutuações de densidade, permissividade elétrica, índice de refração, etc. Flutuações de propriedades sempre existem em meios não idealmente homogêneos, como é o caso de uma fibra óptica real, sendo geralmente iniciadas por estímulos térmicos. Os efeitos de espalhamento são intrínsecos ao material e estão sempre presentes qualquer que seja o nível da potência óptica aplicada (RUFFIN, 2004). Os fenômenos de espalhamento podem ser categorizados em dois regimes; espalhamento espontâneo e espalhamento estimulado. O espalhamento espontâneo

ocorre em condições de baixa potência, quando o campo elétrico da luz incidente é relativamente fraco e não afeta sensivelmente as propriedades físicas do material. Neste caso, tipicamente, os espalhamentos têm origem em flutuações na constante dielétrica, excitadas por efeitos térmicos. Para sinais ópticos suficientemente intensos, o campo elétrico gerado interfere nas propriedades ópticas do material, originando flutuações induzidas, principalmente de densidade, que resultam na intensificação dos efeitos de espalhamento. Os sinais espalhados mais intensos contribuem para novo aumento das flutuações e vice-versa. Neste regime o efeito é denominado de espalhamento estimulado. Pelo fato de serem realimentados positivamente, os fenômenos de espalhamento estimulado apresentam características não lineares.

O espalhamento pode ser resultado de diferentes efeitos físicos. Os principais efeitos de espalhamento são os conhecidos como espalhamento Rayleigh, Brillouin e Raman. O espalhamento Rayleigh é um fenômeno elástico que decorre de microflutuações de densidade (flutuações não coerentes), que não se propagam no material, normalmente iniciadas por efeitos térmicos. O espalhamento Rayleigh portanto não produz deslocamentos de frequência. O espalhamento Brillouin é um fenômeno inelástico que resulta da interação da luz incidente com flutuações periódicas de densidade (macroflutuações quase coerentes) que se propagam no material em forma de ondas acústicas também conhecidas como fônons acústicos. O efeito Raman também é um efeito inelástico, porém resultante da interação da luz com os modos de vibração molecular, ou fônons ópticos. Em fibras ópticas o efeito de espalhamento Brillouin ganha particular importância pela sua influência na máxima potência que pode ser transmitida, ou pelas suas características que o tornam útil para fins de sensoriamento distribuído, dentre outros usos.

Sob o aspecto de energia, os efeitos de espalhamento consistem no espalhamento inelástico dos fótons incidentes para fótons de menor energia, sendo a diferença absorvida pelas vibrações, ou fônons, no meio no qual a luz se propaga. Em outras palavras, parte da energia da onda eletromagnética incidente é transferida para outra onda de luz com comprimento de onda mais longo. A diferença de energia entre as duas ondas se manifesta na forma de fônons acústicos ou fônons ópticos. A onda originada por fótons de menor energia é conhecida como onda de Stokes (em homenagem a Sir. George Gabriel Stokes). A onda incidente que desencadeia o processo é usualmente denominada por onda de bombeio (pump wave), ou luz de bombeio (pump light). Em certas condições fótons com maior nível de energia também

podem ser criados no processo, por absorção de energia dos fônons, dando origem à componentes anti-Stokes, com comprimentos de onda menores que o da onda incidente. Os dois principais fenômenos de espalhamento não linear em fibras ópticas são portanto o Espalhamento Brillouin Estimulado (SBS) e o Espalhamento Raman Estimulado (SRS), ambos relacionados com os modos de excitação vibracional do material. A diferença fundamental entre os dois fenômenos é que no caso do efeito Brillouin há a participação de fônons acústicos (ondas acústicas), enquanto que no efeito Raman há a participação de fônons ópticos ou vibrações moleculares (AGRAWAL, 2002).

A figura 2.1 ilustra as componentes espectrais produzidas pelos efeitos de espalhamento descritos, a partir de uma excitação com comprimento de onda λ_0 .

Figura 2.1: Espectro de frequências resultante dos efeitos de espalhamento

A frequência das componentes Brillouin Stokes e anti-Stokes são dependentes da temperatura T e da deformação mecânica ϵ na fibra, conforme ilustrado no gráfico, sendo que esta dependência é aproximadamente linear. No caso do espalhamento Raman, a amplitude das componentes geradas é influenciada pela temperatura, conforme também ilustrado.

Em potências mais elevadas estes fenômenos causam a atenuação não linear da luz, transferindo parte da potência luminosa incidente para outros modos. Os mecanismos de espalhamento estimulado também podem proporcionar ganho óptico

a sinais cujas frequências sejam coincidentes com as componentes Stokes da luz espalhada (SINGH†; GANGWAR; SINGH, 2007). Esta propriedade de amplificar sinais é particularmente explorada na arquitetura BOTDA descrita neste trabalho.

2.3 Espalhamento Brillouin Estimulado (SBS)

O espalhamento inelástico da luz por fônons acústicos foi identificado por Léon Nicolas Brillouin no início do século passado, tendo sido anunciado em 1922 na sua tese de doutorado (BRILLOUIN, 1922). Outro pesquisador, Leonid Mandelstam, também já havia identificado a possibilidade de ocorrência do efeito em 1918, porém o seu trabalho somente foi publicado em 1926. Por esta razão, em reconhecimento ao esforço de Mandelstam, o efeito é também chamado de Espalhamento Brillouin-Mandelstam (BMS), e algumas vezes ainda referenciado como Brillouin Light Scattering (BLS) ou Brillouin Mandelstam Light Scattering (BLMS).

O Processo de espalhamento estimulado (SBS) foi primeiramente observado por R. Y. Chiao and C. H. Townes, em cristais de quartzo e safira (CHIAO; TOWNES; STOICHEFF†, 1964). O fenômeno foi também observado em fibras ópticas ainda nos anos 70.

2.3.1 Teoria básica do SBS

O Espalhamento Brillouin Estimulado (SBS) ocorre em condições de altas potências, acima do limiar Brillouin Estimulado (ver item 2.3.3). Em fibras ópticas, as flutuações de densidade propagam-se no núcleo comportando-se como ondas acústicas de alta frequência, ou fônons acústicos. As vibrações acústicas criam regiões de compressão e de rarefação, modulando o índice de refração da fibra, o que implica no espalhamento de parte da energia incidente para outras frequências. O espalhamento, causado pela interação com os fônons acústicos se dá através do fenômeno de difração Bragg, dando origem à ondas Stokes, usualmente denominadas como componentes Brillouin. Quando o espalhamento é gerado por flutuações induzidas no material, devido a presença do campo elétrico incidente, ele é

denominado de espalhamento estimulado. Para sinais de alta intensidade, o batimento entre os campos elétricos da onda incidente e da onda Stokes gerada, por efeito de eletrostricção¹, provoca um aumento na amplitude das ondas acústicas. Por sua vez, o batimento da onda incidente com os fônons acústicos promove o reforço da onda Stokes, e vice-versa, realimentando o processo (BOYD, 2008). Este comportamento caracteriza o efeito de Espalhamento Brillouin Estimulado (SBS) que, por conta das realimentações positivas descritas, possui comportamento não linear. Numa fibra óptica, o SBS ocorre somente no sentido de propagação oposto ao da onda incidente, sendo por vezes também referenciado como Retroespalhamento Brillouin (Brillouin Backscattering). O espalhamento Raman ocorre nos dois sentidos de propagação (AGRAWAL, 2002).

O deslocamento de frequência em relação à luz incidente é usualmente referido como deslocamento Brillouin (Brillouin Shift). O deslocamento Brillouin produzido depende não só das propriedades intrínsecas da fibra óptica, mas também do seu estado físico, sendo diretamente influenciado pela temperatura e pela tensão mecânica na mesma, conforme representado na figura 2.1, guardando ainda uma relação linear com estas variáveis. Esta propriedade o torna particularmente útil para aplicações de sensoriamento distribuído. A interação fóton fônon também pode produzir componentes de frequências deslocadas do mesmo valor em relação a frequência da luz incidente, situadas acima desta no espectro, denominadas componentes anti-Stokes, porém de menor amplitude que as componentes Stokes.

O deslocamento em frequência pode ainda ser interpretado como resultado do efeito Doppler produzido pela interação da onda de luz com as ondas acústicas induzidas na fibra. As ondas acústicas que viajam no mesmo sentido da luz incidente dão origem às componentes Stokes, enquanto que aquelas que se propagam no sentido oposto resultam nas componentes anti-Stokes.

Como resultado do processo regenerativo, na região inicial da curva de espalhamento Brillouin estimulado, a intensidade da onda Stokes passa a crescer exponencialmente em relação à incrementos na potência de entrada. A partir deste

¹ O efeito de eletrostricção é caracterizado pela propriedade de certos materiais de apresentarem deformações mecânicas quando submetidos a campos elétricos. Ver (BOYD, 2008).

ponto, a potência da luz transmitida não é mais linear em relação a potência aplicada na fibra, praticamente deixando de aumentar depois de atingido um valor extremo, a partir do qual novos incrementos na potência de entrada serão quase totalmente espalhados e refletidos para a entrada da fibra (backscattering).

De acordo com a teoria clássica, tanto a energia total como o momento devem ser conservados no processo de espalhamento. No processo de espalhamento Brillouin, é necessária a extinção de um fóton da onda incidente para a criação de um fóton Stokes e, simultaneamente, de um fônon acústico. A energia de uma onda eletromagnética está diretamente associada à sua frequência, multiplicada pela constante de Planck. Considerando-se a frequência do campo elétrico da luz de bombeio como ω_P , o deslocamento Brillouin gerado (frequência da onda acústica) como ω_B , e denominando por ω_S a frequência da onda Stokes originada no processo, aplicando as leis da conservação da energia e simplificando-se os termos comuns, pode-se então escrever:

$$\omega_B = \omega_P - \omega_S \quad (2.1)$$

Para conservação do momento, analogamente pode-se escrever que:

$$\mathbf{k}_A = \mathbf{k}_P - \mathbf{k}_S \quad (2.2)$$

onde, $\mathbf{k}_A$ é o vetor de momento da onda acústica e, $\mathbf{k}_P$ e $\mathbf{k}_S$ são os vetores de momento da onda incidente e da onda Stokes, respectivamente.

Considerando como V_a a velocidade acústica no material da fibra, e a relação de dispersão $|\mathbf{k}_A| = \omega_B/V_a$, a frequência da onda acústica pode ser escrita por (AGRAWAL, 2002):

$$\omega_B = V_a |\mathbf{k}_A| = V_a |\mathbf{k}_P - \mathbf{k}_S| \quad (2.3)$$

ou,

$$\omega_B = 2V_a |\mathbf{k}_P| \sin(\theta/2) \quad (2.4)$$

onde, θ é o ângulo entre os vetores de momento da onda incidente e da onda Stokes (ângulo de reflexão). Os módulos de $\mathbf{k}_p$ e $\mathbf{k}_s$ são adotados com valores iguais. A figura 2.2 ilustra uma representação gráfica do processo de espalhamento Brillouin e da orientação dos vetores $\mathbf{k}_A$, $\mathbf{k}_p$ e $\mathbf{k}_s$.

Figura 2.2: a) Representação gráfica do espalhamento Brillouin
b) representação gráfica dos vetores $\mathbf{k}_A$, $\mathbf{k}_p$ e $\mathbf{k}_s$

A partir da expressão 2.4 fica claro que a frequência de deslocamento depende do ângulo θ . Numa fibra óptica monomodo os sinais se propagam somente na direção do eixo da fibra, portanto, os ângulos relevantes são $\theta = \pi$, e $\theta = 0$. Com $\theta = 0$ a expressão se anula, portanto, não há espalhamento no mesmo sentido de propagação da onda incidente. Quando $\theta = \pi$, representa a situação de espalhamento no sentido oposto ao de propagação da onda incidente, que é máximo nesta condição. O deslocamento de frequência ν_B que ocorre no processo de retroespalhamento pode então ser calculado a partir da equação 2.4, tendo-se que:

$$\nu_B = \frac{\omega_B}{2\pi} \quad (2.5)$$

e que:

$$|\mathbf{k}_p| = \frac{2\pi n}{\lambda_p} \quad (2.6)$$

portanto, o deslocamento de frequência Brillouin pode ser dado pela expressão:

$$\nu_B = \frac{2nV_a}{\lambda_p} \quad (2.7)$$

onde, λ_p é o comprimento de onda da luz de bombeio (pump light), e n é o índice de refração da fibra. Valores típicos de V_a e n são; $5,9 \cdot 10^3 \text{ m/s}$ e 1,45, respectivamente. Em fibras ópticas monomodo com núcleo de sílica operando na faixa de $1,55 \mu\text{m}$, o deslocamento de frequência Brillouin situa-se entre 10 e 13 GHz, aproximadamente. Em fibra ópticas monomodo, o espalhamento Brillouin espontâneo também pode ocorrer no sentido direto (mesmo sentido de propagação da onda de bombeio), por um processo conhecido como espalhamento Brillouin guiado por ondas acústicas. Contudo, a energia espalhada no sentido direto é ínfima sendo geralmente desprezada (AGRAWAL, 2002).

Este é o mecanismo do Espalhamento Brillouin Estimulado que, em última instancia pode transferir totalmente qualquer incremento na potência incidente para as ondas de espalhamento geradas (SINGH†; GANGWAR; SINGH, 2007).

2.3.2 Espectro do Ganho Brillouin

O fenômeno Brillouin é resultado da interação da luz com as vibrações acústicas na fibra, portanto, o ganho Brillouin é dependente da frequência e está sujeito às ressonâncias acústicas da mesma. A largura de banda do espectro Brillouin está estritamente relacionada com o tempo de amortecimento, ou duração, dos fônons acústicos no núcleo da fibra. A dependência do ganho como função da frequência é descrita através do Espectro do Ganho Brillouin. Em fibras de sílica, o Espectro do Ganho Brillouin possui uma banda de frequências relativamente estreita, da ordem de poucas dezenas de MHz.

Tomando-se em conta a natureza de decaimento exponencial dos fônons acústicos, o ganho Brillouin g_B apresenta a forma de uma curva Lorentziana e pode ser escrito como:

$$g_B(\omega) = \frac{g_B(\omega_B)}{1 + (\omega - \omega_B)^2 T_B^2} \quad (2.8)$$

onde, T_B é o tempo de amortecimento dos fônons acústicos na fibra. O pico da curva de ganho Brillouin ocorre no ponto onde $\omega = \omega_B$.

Tanto o deslocamento Brillouin ν_B como o ganho Brillouin g_B , podem variar de fibra para fibra, por conta da natureza guiada da luz e também pela presença de dopantes no núcleo, dependendo ainda da sua concentração e homogeneidade. A figura 2.3 apresenta exemplos de curva de ganho Brillouin para três tipos de fibra monomodo, para $\lambda_p = 1.525 \mu m$. A fibra (a) apresenta um núcleo de sílica pura, apresentando um deslocamento Brillouin em torno de 11,25 GHz. As fibras (b) e (c) apresentam deslocamentos Brillouin menores devido à maior concentração de germânio no seus núcleos. O duplo pico apresentado pela fibra (b) resulta da distribuição não homogênea de germânio no seu núcleo.

Figura 2.3: Espectro do ganho Brillouin com bombeio de $1.525 \mu m$ para fibras com diferentes dopagens: (a) fibra com núcleo de sílica; (b) fibra tipo “depressed-cladding”; (c) fibra com dispersão deslocada.

Fonte: Agrawal (2002)

A largura de banda do ganho Brillouin é principalmente atribuída às variações no diâmetro do núcleo ao longo da fibra. Como esta é uma característica particular de cada fibra, a largura de banda do SBS também é geralmente diferente, podendo exceder a 100 MHz em alguns casos. Contudo os valores típicos ficam abaixo dos 50 MHz, para λ_p próximo de $1,55 \mu m$. O valor de pico do ganho Brillouin g_B para fibras

de sílica é aproximadamente $5 \cdot 10^{-11}$ m/W (ver nota ²). A expressão para cálculo do valor de pico do ganho Brillouin é apresentada no capítulo 3, equação 3.4.

Os mecanismos de espalhamento estimulado também podem ser utilizados para proporcionar ganho óptico a sinais cujas frequências estejam contidas no espectro do ganho Brillouin da fibra.

2.3.3 Potência crítica Brillouin

Em condições de baixa potência, a intensidade da componente Stokes guarda uma fraca dependência da potência incidente, prevalecendo o espalhamento Brillouin espontâneo, originado por excitações térmicas do material. A partir de certo valor, devido à natureza regenerativa, a intensidade do espalhamento se destaca do ruído e passa a crescer exponencialmente, em relação à potência da onda incidente. O resultado é a correspondente diminuição da potência transmitida pela fibra. O ponto da curva onde os sinais Brillouin refletidos apresentam potência equivalente à da luz transmitida é conhecido como Limiar de Espalhamento Brillouin Estimulado ou potência crítica SBS. Acima deste limiar a potência entregue na extremidade da fibra não é mais uma função linear da potência aplicada, tendo-se parte cada vez mais significativa da energia sendo espalhada e refletida em direção à sua entrada. Este é o motivo pelo qual o SBS é um sério limitante da potência que pode ser empregada em fibras de comunicação de dados, requerendo o emprego de diversas estratégias para o seu contorno. O equacionamento a seguir descreve o comportamento do efeito.

Considerando a interação entre a onda Stokes e uma onda incidente de natureza contínua, ou quase contínua o crescimento inicial da onda Stokes pode ser definido como:

$$\frac{dI_S}{dz} = g_B I_P I_S \quad (2.9)$$

² A unidade m/W advém da análise dimensional das expressões envolvidas no cálculo do ganho.

onde, g_B é o coeficiente de ganho Brillouin, I_P e I_S são as intensidades da onda incidente (bombeio) e da onda Stokes, respectivamente. A variável z representa a posição linear ao longo do eixo da fibra. Considerando-se que a onda Stokes se propaga no sentido oposto ao da onda incidente, e inserindo as perdas na fibra, a equação 2.9 pode ser escrita como:

$$\frac{dI_S}{dz} = -g_B I_P I_S + \alpha_S I_S \quad (2.10)$$

A equação acoplada da onda incidente pode ser escrita como:

$$\frac{dI_P}{dz} = -\frac{\omega_P}{\omega_S} g_B I_P I_S - \alpha_P I_P \quad (2.11)$$

onde, α_P é o coeficiente de perdas na frequência da onda incidente. O processo de realimentação do espalhamento Brillouin é então governado pelas duas equações acima. Como as frequências ω_P e ω_S são muito próximas, pode-se simplificar as equações considerando $\omega_P = \omega_S$. Analogamente pode-se considerar $\alpha_P = \alpha_S = \alpha$, o que resulta em:

$$\frac{dI_S}{dz} = -g_B I_P I_S + \alpha I_S \quad (2.12)$$

e,

$$\frac{dI_P}{dz} = -g_B I_P I_S - \alpha I_P \quad (2.13)$$

Ainda, se forem consideradas nulas as perdas na fibra, as equações 2.12 e 2.13 podem ser reduzidas a:

$$I_S - I_P = k \quad (2.14)$$

onde k , é um valor constante. A equação 2.14 assegura a conservação de energia da luz no processo de espalhamento. A potência crítica, ou limiar Brillouin, representa a potência onde o processo não linear se inicia. Neste ponto, a potência da onda Stokes gerada é igual a potência da onda incidente transmitida. Para situações onde a potência da onda Stokes é muito menor que a potência da onda incidente, pode-se desprezar o termo $g_B I_P I_S$ na equação 2.13, o que resulta na equação 2.15, abaixo:

$$\frac{dI_P}{dz} = -\alpha I_P \quad (2.15)$$

A solução da equação 2.15 poder ser obtida por:

$$I_P(z) = I_P(0) e^{-\alpha z} \quad (2.16)$$

onde, $I_P(z)$ e $I_P(0)$ são as intensidades nas posições $z = z$, e $z = 0$. Das equações 2.12 e 2.16, temos:

$$\frac{dI_S}{dz} = -g_B I_P(0) e^{-\alpha z} I_S + \alpha I_S \quad (2.17)$$

cujas soluções podem ser dadas por:

$$I_S(0) = I_S(L) e^{[g_B I_P(0) L_{eff} - \alpha L]} \quad (2.18)$$

onde, L_{eff} é o comprimento efetivo onde ocorre a interação, sendo ligeiramente menor que o comprimento da fibra devido aos efeitos de absorção da luz de bombeio. O comprimento efetivo L_{eff} , pode ser calculado por:

$$L_{eff} = [1 - e^{-\alpha L}] / \alpha \quad (2.19)$$

As equações 2.16 e 2.18 podem ainda ser escritas como:

$$P_S(0) = P_S(L) e^{-\alpha L} e^{\left(\frac{g_B P_P(0) L_{eff}}{A_{eff}}\right)} \quad (2.20)$$

e,

$$P_P(L) = P_P(0) e^{-\alpha L} \quad (2.21)$$

onde, A_{eff} é a área efetiva do núcleo da fibra. A área efetiva é um importante parâmetro em fibras ópticas e determina como a luz é confinada no núcleo, estando relacionada com os modos de propagação. Os efeitos não lineares são mais pronunciados em fibras com menores áreas efetivas³.

As intensidades são relacionadas com a potência por:

$$P_S = A_{eff} I_S \quad (2.22)$$

e,

$$P_P = A_{eff} I_P \quad (2.23)$$

A potência crítica, ou limiar Brillouin, pode ser calculado a partir das equações 2.20 e 2.21, cujo cálculo pode ser aproximado por (SINGH†; GANGWAR; SINGH, 2007):

$$P_{th} \approx \frac{21bA_{eff}}{g_B L_{eff}} \quad (2.24)$$

onde, o termo b é o valor da polarização relativa entre a onda de bombeamento e a onda Stokes, situando-se entre 1 e 2. Tipicamente, $A_{eff} \approx 50 \mu\text{m}^2$ e $g_B = 4 \cdot 10^{-11} \text{ m/W}$ para fibras monomodo operando com comprimento de onda de $1.55 \mu\text{m}$. Para um $L_{eff} \approx 20 \text{ km}$, fazendo-se $b = 1$, resulta na potência de limiar $P_{th} = 1,3 \text{ mW}$. Considerando-se a polarização relativa $b = 2$, o valor do limiar SBS será o dobro desse valor.

³ Um tratamento mais detalhado sobre este assunto pode ser encontrado em (AGRAWAL, 2002).

A potência de limiar SBS depende essencialmente do ganho Brillouin da fibra, que por sua vez depende da sua homogeneidade, assim como dos dopantes utilizados na sua fabricação. As curvas mostradas na figura 2.4 apresentam o comportamento típico da potência espalhada Brillouin em função da potência aplicada numa fibra óptica, e o respectivo efeito na potência óptica transmitida.

Figura 2.4: Comportamento do SBS e seu efeito na potência óptica transmitida numa fibra óptica de 13 km

Note-se que, acima do limiar de Espalhamento Estimulado, a potência transmitida passa a aumentar cada vez menos até que, numa condição limite, torna-se praticamente constante e independente da potência óptica aplicada. Após esta condição limite, novos incrementos na potência aplicada serão totalmente espalhados para as componentes Brillouin e refletidos para a entrada da fibra.

2.4 Aplicações do fenômeno SBS

O fenômeno de Espalhamento Brillouin Estimulado (SBS) é o efeito não linear predominante em fibras ópticas e, devido ao seu comportamento e características, encontra larga aplicação em diversas funções de sensoriamento distribuído e outras. Alguns exemplos de aplicação com sensores distribuídos são; no monitoramento de

estruturas civis, encostas, linhas férreas, detecção de vazamentos em dutos, monitoramento de temperatura em cabos de transmissão elétrica, monitoramento de integridade de cabos de comunicação e outros. Outras aplicações podem ser na implementação de amplificadores ópticos, combinadores de feixes, atraso e avanço de pulsos, dentre outras. Diversas metodologias já foram desenvolvidas e as pesquisas continuam em busca de melhores maneiras de tirar proveito deste importante fenômeno de espalhamento em fibras ópticas.

Com a popularização do uso de fibras ópticas há uma tendência de maior difusão do uso das tecnologias de sensoriamento distribuído, como a apresentada neste trabalho de pesquisa e, portanto, do Espalhamento Brillouin.

3 METODOLOGIA

Neste capítulo são apresentadas as diversas etapas do experimento, desde a concepção do arranjo, a descrição dos componentes, módulos e dispositivos especiais que precisaram ser construídos, culminando com a descrição dos testes e medições realizadas em laboratório.

Para subsidiar a elaboração do trabalho, além da consulta a livros, foi feita uma ampla pesquisa em bases de dados científicas, como WEB OF SCIENCE e SCOPUS, para localização de artigos e publicações relacionadas ao tema. As palavras chave utilizadas foram as seguintes: Distributed Sensing, Distributed Fiber Optic Sensing, Intrusion Detection, Brillouin Scattering, BOTDA, assim como referências específicas. Como complemento de informações também foram consultados documentos de fabricantes como, catálogos, descritivos, folhetos, especificações técnicas, apresentações e outros materiais.

3.1 Técnicas De Sensoriamento Distribuído

Os sensores distribuídos fundamentam-se na medição da luz refletida no interior da fibra óptica, oriundas dos fenômenos de espalhamento Rayleigh, Brillouin ou Raman. Sensores baseados no fenômeno Brillouin são sensíveis à deformações mecânicas e à temperatura na fibra, podendo cobrir distâncias de dezenas de Kilômetros com boa sensibilidade e excelente resolução espacial nas medidas. Sensores do tipo Rede de Bragg também são comumente empregados, em forma de múltiplos sensores numa mesma fibra, contudo, são úteis para medições pontuais, quando os pontos de medição são previamente determinados.

Alguns exemplos de sensores para medição distribuída baseados no Espalhamento Brillouin Estimulado são; Distributed Temperature Sensing (DTS), Distributed Strain and Temperature Sensing (DSTS), Distributed Acoustic Sensing (DAS) e outros. Os DAS são dedicados ao sensoriamento de vibrações e um exemplo de sua aplicação é para a detecção de vazamentos em dutos de transporte. A

detecção é feita por meio da identificação dos ruídos gerados pelo fluido. Os sistemas DTS e os DSTS podem ser usados para monitoramento de temperatura em tanques, vasos, torres, cabos de transmissão elétricos e outras aplicações de longa distância. Também podem ser aplicados para detecção de vazamentos, por meio das variações térmicas produzidas pelo escape do fluido ou pela sua presença externamente ao duto.

Os primeiros sensores distribuídos com uso de fibra óptica foram implementados com base na técnica Optical Time Domain Reflectometry (OTDR), que foi introduzida nos anos 70 como um novo método para medição da atenuação em fibras ópticas, por meio das reflexões Rayleigh (BARNOSKI et al., 1977). Nos anos 90 J. P. Dakin (1993) sugeriu que o sistema OTDR poderia ser aplicado como um sensor distribuído, dando o primeiro passo para o avanço das técnicas de sensoriamento baseadas em fibras ópticas. O OTDR continua sendo muito usado na área de telecomunicações como ferramenta para medição de perdas e identificação de falhas em linhas de fibra óptica.

As técnicas mais difundidas de sensoriamento distribuído de longa distância baseadas no Espalhamento Brillouin Estimulado, podem ser divididas em duas categorias principais; a técnica Brillouin Optical Time Domain Reflectometry (BOTDR) e a técnica Brillouin Optical Time Domain Analysis (BOTDA). Ambas se baseiam na observação das mudanças induzidas no deslocamento Brillouin, conforme ilustrado na figura 3.1. As duas técnicas são descritas nos tópicos a seguir.

Figura 3.1: Variação do deslocamento Brillouin em função de tensões induzidas na fibra

3.1.1 Técnica BOTDR

A técnica Brillouin Time Domain Reflectometry (BOTDR) consiste no bombeamento da fibra com pulsos laser e na posterior análise dos sinais Brillouin refletidos. Para facilitar a avaliação do deslocamento Brillouin, a detecção dos sinais é usualmente feita com emprego de heterodinagem. Um exemplo de BOTDR é o descrito por Ohno et al. (2001). O arranjo típico de um BOTDR é mostrado na figura 3.2.

Figura 3.2: Arranjo típico BOTDR

No processo de espalhamento Stokes, incluindo-se os efeitos Brillouin e Raman, apenas uma pequena fração da luz incidente, menos de um fóton em cada mil, é espalhada para sinais de frequências diferentes daquela da luz incidente (APPLICATIONS of fiber optic distributed strain and temperature sensors. Disponível em: <http://www.ozoptics.com/ALLNEW_PDF/APN0008.pdf>. Acesso em: 10 jan. 2016). Isto ocorre por conta da curta duração dos pulsos laser, que são ajustados para excitar apenas um pequeno trecho da fibra em cada instante, e assim permitir a localização dos estímulos. Portanto, no melhor caso, os sinais Brillouin refletidos terão apenas uma pequena fração da intensidade da luz incidente. Por isso, nos sistemas BOTDR os sinais detectados são em geral fracos e com baixa relação sinal-ruído. Considerando-se este aspecto e ainda a atenuação dos sinais imposta pela fibra, a faixa de medição prática fica limitada a cerca de duas dezenas de quilômetros.

Uma vantagem deste método é que necessita acesso a apenas uma das extremidades da fibra. No caso da fibra ser cortada ou interrompida, o sistema ainda continua funcionando no trecho remanescente conectado ao interrogador.

3.1.2 Técnica BOTDA

A Técnica Brillouin Time Domain Analysis (BOTDA) é um pouco mais complexa e baseia-se no princípio da amplificação da luz por meio do Espalhamento Brillouin Estimulado. Esta técnica apresenta um desempenho bem superior ao da técnica BOTDR e, devido ao sinal muito mais intenso que pode ser gerado, é possível cobrir distâncias comparativamente maiores. Um exemplo de arranjo BOTDA é mostrado na figura 3.3.

Figura 3.3: Arranjo típico BOTDA

A configuração típica de um sensor BOTDA requer o uso de dois lasers direcionados em sentidos opostos na fibra; um laser de bombeio (pulsado) e um laser de prova (CW). A luz de bombeio é injetada em um dos extremos da fibra enquanto que a luz de prova é aplicada no outro. Quando a diferença entre as duas frequências é igual ao deslocamento Brillouin da fibra, ocorre uma forte interação com as ondas acústicas (fônons) o que resulta na amplificação do sinal de prova. O fator de

amplificação resultante varia de acordo com o ponto da curva de ganho Brillouin onde ocorre a interação.

Note-se que para obtenção da luz de prova (probe light) foi empregada uma segunda fonte laser, sincronizada com o laser de bombeio por meio de um laço fechado por fase (PLL). Neste arranjo, a frequência do laser de prova é variada em passos de modo a varrer todo o espectro Brillouin da fibra. Deste modo é possível determinar a posição dos picos Brillouin em cada ponto ao longo da extensão da fibra e posteriormente correlacionar com as variáveis que estão sendo medidas.

A técnica BOTDA requer o acesso às duas extremidades da fibra, o que em alguns casos pode ser uma desvantagem, porém, se destaca por suas características de faixa dinâmica, boa intensidade dos sinais produzidos, e capacidade de cobrir grandes distâncias, tendo sido a técnica escolhida como base para desenvolvimento do interrogador.

3.1.3 Outras metodologias

Existem ainda muitas outras metodologias de sensoriamento distribuído baseadas no uso de fibra ópticas, que surgiram com o a proposta de melhorar suas características em quatro áreas essenciais; a resolução de medida, exatidão, distância coberta e tempo de medição. Como estas características são inter-relacionadas, geralmente a melhora em uma delas é conseguida com prejuízo das demais. Por exemplo, há métodos capazes de propiciar resoluções de medida da ordem de centímetros, mas o seu alcance é limitado à bem curtas distâncias. A técnica Dark-Pulse BOTDA (DP-BOTDA) é um exemplo que propicia resoluções de medida da ordem 20mm sem demasiado impacto nas outras características (BROWN; COLPITTS; BROWN, 2007). Outros exemplos de configurações são; Brillouin Optical Frequency Domain Analysis (BOFDA), Brillouin Optical Correlation Domain Analysis (BOCDA), Coherent Time Domain Reflectometry (COTDR) e Stimulated Brillouin Scattering Based Slow Light. Discussões sobre essas metodologias são apresentadas por Zhang, Hu e Zhang (2013) e Wang et al. (2013).

Há ainda os sistemas baseados em fibras fotônicas com dopagem do núcleo que, por apresentarem duplo pico Brillouin, permitem medir simultaneamente a

deformação e a temperatura na mesma fibra óptica (ZOU; BAO; CHEN, 2004). Contudo, estas metodologias não são o foco do presente trabalho e não serão abordadas.

3.2 Arquitetura do Interrogador

3.2.1 Critérios de projeto

A arquitetura do sistema foi baseada num BOTDA, devido as suas características favoráveis, porém, como não é de suma importância medir com exatidão a magnitude dos eventos de intrusão, omitiu-se a varredura sequencial com uso de diferentes frequências. O principal objetivo foi o de conseguir um menor tempo de resposta e também evitar os problemas oriundos do eventual desequilíbrio de potência entre as diversas varreduras (JIANG et al., 2014). Também almejou-se a simplificação do sistema, tendo sido empregada uma única fonte laser para geração dos sinais de bombeio e de prova.

O projeto do sistema foi baseado no comprimento de onda de $1,55\ \mu\text{m}$, para permitir maior flexibilidade na obtenção dos itens, já que esta faixa é comumente utilizada em sistemas de telecomunicações.

3.2.2 Descrição do arranjo

O diagrama do interrogador de fibra óptica proposto é mostrado na figura 3.4. Os principais módulos e componentes do sistema, assim como as suas características mais importantes, são descritos a seguir.

A fonte laser deve apresentar uma potência de saída da ordem de 5 mW ou mais, idealmente com uma largura de linha não superior a 1MHz. A estabilidade requerida do laser não é tão crítica considerando-se que a largura de banda típica do ganho Brillouin das fibras monomodo situa-se na casa dos 15 a 20 MHz. Larguras de linha de até 10% da largura do ganho Brillouin ainda estariam aceitáveis para este método.

Figura 3.4: Diagrama do interrogador de fibra óptica para detecção de intrusão

O laser é acoplado ao circuito óptico por meio de um divisor 70:30, passando por dois controladores de polarização.

Os pulsos de bombeio são gerados a partir de um modulador de amplitude eletro-óptico tipo Mach-Zehnder (EOM1), controlado por um gerador de pulsos. O modulador EOM1 deve apresentar uma largura de banda compatível com os rápidos pulsos de chaveamento aplicados e, preferencialmente, deve ser do tipo “Zero Chirp” para evitar a introdução de deslocamentos de fase no sinal. O módulo gerador de pulsos utilizado deve apresentar características de chaveamento rápido e ser capaz de produzir pulsos com larguras a partir de 20ns, com amplitude compatível com a entrada do modulador EOM1 escolhido. Os pulsos de luz presentes na saída do modulador EOM1 são enviados ao amplificador óptico (EDFA), onde a sua amplitude é elevada a níveis suficientes para excitar a fibra e gerar o SBS. A Potência requerida depende das características e do comprimento da fibra utilizada como sensor. Os pulsos de bombeio amplificados são aplicados a um dos extremos da fibra sensora por meio do circulador óptico C. Como elemento sensor distribuído foi considerado uma fibra óptica monomodo de sílica padrão de mercado, do tipo normalmente utilizada em links de comunicação de dados.

A luz de prova é conseguida a partir da mesma fonte laser, deslocando-se a sua frequência por meio de modulação, o que é feito no modulador EOM2. O sinal de luz modulado em amplitude (AM-DSB) apresenta duas bandas laterais (USB e LSB), uma acima e uma abaixo da frequência da portadora, que serão ajustadas de modo a coincidir com a frequência das componentes Brillouin. O sinal portador é suprimido por meio do ajuste da polarização do modulador EOM2, concentrando a energia nas bandas laterais que correspondem ao sinal de prova. O sinal modulante é fornecido pelo módulo gerador de SHF, cuja frequência estará entre 10 GHz e 13 GHz, dependendo da fibra óptica utilizada. O módulo de geração de sinais SHF deve possuir boa pureza espectral e estabilidade de frequência compatível com a largura de linha do laser, para que a luz de prova não apresente espectro demasiadamente amplo. O Modulador EOM2 deve apresentar largura de banda compatível com as frequências utilizadas.

A obtenção da luz de prova a partir da mesma fonte da luz de bombeio, traz uma vantagem que é a compensação automática de eventuais desvios (drifts) na frequência do laser, mantendo-se as bandas laterais presentes na saída do modulador EOM2 sempre em correspondência com as componentes Brillouin. Isto permite liberdade para escolha do comprimento de onda mais adequado para a operação do laser, sem afetar a detecção de eventos. O sinal de prova é enviado à outra extremidade da fibra sensora por meio de um isolador óptico, inserido para evitar que os pulsos de bombeio de alta potencia, cheguem ao modulador EOM2. Também foi previsto um atenuador variável para permitir o ajuste da intensidade do sinal de prova.

Os sinais Brillouin amplificados e refletidos para a entrada da fibra são recebidos pelo circulador C e canalizados ao fotodetector, onde são convertidos para sinais elétricos. Idealmente, o fotodetector deve apresentar resposta em frequência de DC a 100 MHz, pelo menos, com baixos níveis de ruído. Para supressão das componentes anti-Stokes, antes do fotodetector foi prevista um Rede de Bragg (FBG) com largura de banda de 50 GHz e comprimento de onda central próximo de 1549,32 nm. Os sinais detectados são finalmente encaminhados ao sistema de aquisição de dados, a partir do qual será feito o registro dos mesmos de maneira sincronizada com os pulsos de bombeio.

O fato do método não utilizar varredura do sensor com diferentes frequências, propicia tempo de resposta mais rápido, além de evitar os problemas descritos.

3.2.3 Funcionamento do interrogador

O deslocamento de frequência associado ao processo de espalhamento Brillouin é dependente do índice de refração da fibra e da velocidade de propagação dos fônons acústicos, sendo descrito pela equação 2.7, repetida a seguir (AGRAWAL, 2002):

$$\nu_B = \frac{2nV_a}{\lambda_p} \quad (2.7)$$

onde, λ_p é o comprimento de onda da luz de bombeio, e n é o índice de refração da fibra, e V_a é a velocidade acústica. Em fibras ópticas monomodo com núcleo de sílica operando na faixa de 1.55 μm , o deslocamento Brillouin ν_B típico situa-se entre 10 e 13 GHz.

Devido à dependência de n e de V_a , o deslocamento Brillouin guarda uma relação linear com a temperatura e com a deformação na fibra, podendo ser descrito pela seguinte expressão aproximada:

$$\nu_B(\mathcal{E}, T) = \nu_{B0} + C_{\mathcal{E}}(\mathcal{E} - \mathcal{E}_0) + C_T(T - T_0) \quad (3.1)$$

onde, T e $\mathcal{E}$ são a temperatura e a deformação na fibra, respectivamente⁴; T_0 , $\mathcal{E}_0$ e ν_{B0} são a temperatura, a deformação e o deslocamento Brillouin nas condições de referencia, respectivamente. $C_{\mathcal{E}}$ e C_T são os coeficientes de dependência relativos à deformação e à temperatura, respectivamente. O valor típico do coeficiente $C_{\mathcal{E}}$ para fibras monomodo operando em 1.55 μm , é de 50 kHz/ $\mu\mathcal{E}$, ou 50 MHz para cada 0,1% de alongação. A sensibilidade Brillouin típica das fibras de sílica para excitações térmicas é de cerca de 1 MHz / K.

Desprezando-se os efeitos da temperatura, que tendem a ser mais uniformemente distribuídos no sensor e podem ser facilmente compensados, podemos simplificar a expressão anterior para:

⁴ O coeficiente de deformação $\mathcal{E}$ é um número adimensional, sendo calculado pela razão $\Delta L/L$.

$$v_B(\mathcal{E}) = v_{B0} + C_{\mathcal{E}}(\mathcal{E} - \mathcal{E}_0) \quad (3.2)$$

A largura espectral do ganho Brillouin Δv_B é relacionada com o tempo de decaimento dos fônons acústicos e pode ser escrita como:

$$\Delta v_B = \frac{1}{\pi T_B} \quad (3.3)$$

onde, T_B é o tempo de vida dos fônons acústicos.

O ganho Brillouin máximo pode ser obtido pela expressão 3.4, abaixo (NIKLÈS; THÉVENAZ; ROBERT, 1997).

$$g(v_B) = \frac{2\pi n^7 P_{12}^2}{c\lambda^2 \rho V_a \Delta v_B} \quad (3.4)$$

onde,

n = índice de refração da fibra;

P_{12} = constante fotoelástica da fibra

λ = comprimento da onda da luz de prova (CW)

c = velocidade de propagação da luz no vácuo

ρ = densidade da fibra

Δv_B = largura de banda do ganho Brillouin

V_a = velocidade de propagação acústica na fibra

Os valores típicos de parâmetros para cálculo do Ganho Brillouin, com $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$, são dados na tabela 3.1, a seguir.

Tabela 3.1: Valores típicos de parâmetros de fibras ópticas para cálculo do ganho Brillouin com $\lambda = 1,55 \mu\text{m}$

Parâmetro	Símbolo	Valor
Índice de refração	n	1,45 a 1,5
Constante fotoelástica	P_{12}	0,29
Densidade	ρ	2200 kg/m ³
Velocidade acústica	V_a	6000 m/s
Largura do Ganho Brillouin	$\Delta\nu_B$	15 a 20 MHz

Para se conseguir a máxima amplificação dos sinais Brillouin gerados, a frequência do sinal de prova deve coincidir com a frequência da componente Stokes. Portanto, a frequência do gerador SHF deverá ser ajustada de modo a coincidir com o deslocamento Brillouin, na condição da fibra relaxada. O sinal de prova terá a máxima amplificação nesta condição. Excitações mecânicas na fibra irão causar o deslocamento da curva de ganho Brillouin, reduzindo o ganho conferido ao sinal neste ponto ou região. Desta maneira, os sinais de intrusão podem ser detectados e localizados. Como a velocidade de propagação da luz na fibra é conhecida, a localização dos eventos pode ser determinada facilmente com base no tempo decorrido entre a emissão do pulso de bombeio e a detecção do sinal refletido, similarmente ao princípio do radar.

Considerando uma fibra de comprimento L , os pulsos de bombeio são introduzidos no ponto $z = 0$ da fibra e se propagam no sentido $+z$, enquanto que a luz de prova CW é inserida na extremidade oposta, no ponto $z = L$, propagando-se no sentido de $-z$. O sinal de prova CW detectado no fotodetector, no ponto $z = 0$, é dependente do tempo. Sendo v a velocidade da luz na fibra, um sinal amplificado no ponto $z = L$, atinge o fotodetector, no ponto $z = 0$, no tempo $t = 2L/v$ após a introdução do pulso de bombeio. Portanto a luz CW aparece distribuída num intervalo de tempo dado por $2L/v$. Nos pontos onde a luz de prova CW está em sintonia com a componente Stokes, a amplificação Brillouin é máxima, aparecendo com maior intensidade no fotodetector. O ganho Brillouin diminui à medida em que a ressonância da fibra muda e a componente Stokes se desloca. Por consequência, o sinal sofre uma diminuição de amplitude nos pontos onde a fibra foi perturbada (tensionada ou

comprimida). Para conversão da escala de tempo em distâncias utiliza-se como base as reflexões geradas pelos extremos da fibra, interpolando-se a posição dos sinais lidos.

A amplificação Brillouin é praticamente independente do ponto de interação z , já que a atenuação das duas ondas têm tendências opostas e quase que se compensam. Contudo, a amplificação resultante depende do ponto de interação na curva do SBS. Ainda, a luz amplificada num ponto z genérico será atenuada até que atinja o ponto $z = 0$, onde será detectada. Por este motivo os sinais detectados são mais intensos nos pontos próximos à origem e mais tênues nos pontos próximos a $z = L$ (THÉVENAZ; SOTO, 2013). A figura 3.5 ilustra a curva de resposta teórica aproximada que seria lida no fotodetector, com uma intrusão localizada na região intermediária do sensor, desconsiderando-se os efeitos produzidos pelas mudanças de polarização e outros ruídos.

Figura 3.5: Curva de resposta teórica mostrando os sinais Brillouin refletidos e o efeito produzido pela intrusão

Considerando a taxa de atenuação da fibra na frequência da luz de prova, como α_{CW} , e sendo α_p o coeficiente de atenuação na frequência da luz de bombeio, ainda assumindo que os pulsos de bombeio tenham uma duração w pequena, sendo $P_p(0)$ a sua potência de pico, a potência $P_d(z)$ detectada no ponto $z = 0$, no instante $t = 2z/v$, pode ser dada pela expressão a seguir (KWON et al., 2002).

$$P_d(z) = P_{CW}(L)e^{(-\alpha_{CW} L)} + \left(\frac{g}{A_{eff}}\right) \cdot \left(\frac{v_W}{2}\right) P_{CW}(L)e^{(-\alpha_{CW} L)} P_p(0) e^{(-\alpha_p z)} \quad (3.5)$$

onde, g é o fator de ganho Brillouin; $P_{CW}(L)$ é a potência da onda de prova no ponto L e A_{eff} é a secção efetiva da fibra. A expressão acima é válida para potências P_{CW} suficientemente pequenas, abaixo da saturação.

A resolução espacial das medidas está diretamente relacionada com a largura do pulso de bombeio aplicado. Como a resposta aparece distribuída no tempo $t = 2L/v$, o comprimento do intervalo excitado da fibra, ΔL , e que simultaneamente está produzindo espalhamento, pode ser determinado por:

$$\Delta L = \frac{wv}{2} \quad (3.6)$$

Por exemplo, numa fibra de sílica, cujo índice de refração é próximo a 1,5, com pulsos de bombeio de 100 ns, a resolução espacial é da ordem de 10 m. Pulsos largos produzem sinais mais intensos e com melhor relação sinal/ruído, contudo, degradam a resolução espacial. Pulsos mais estreitos favorecem a resolução espacial porém geram menos espalhamento e pioram a relação sinal/ruído, dificultando a detecção dos sinais. A escolha da largura de pulso mais adequada irá depender do comprimento da fibra utilizada, da natureza das intrusões a serem detectadas e da sensibilidade desejada, guardando um compromisso entre esses fatores. Devido à natureza e ao tempo de duração dos fônons acústicos, para excitar o fenômeno os pulsos de bombeio não devem ter duração inferior a 10 ns.

3.3 Medições

3.3.1 Arranjo experimental

Para reproduzir o arranjo sugerido no item 3.2.2 foram necessárias algumas adaptações, por conta dos itens disponíveis e também para facilitar os ajustes e a

aquisição dos dados. Alguns dos módulos foram substituídos por instrumentos de bancada, e outros módulos de apoio como um amplificador de pulsos e um controlador de temperatura, assim como a giga de testes utilizada para simulação das intrusões, foram especialmente construídos, incluindo-se o fotodetector. O arranjo prático que foi montado em bancada encontra-se representado na figura 3.6.

Figura 3.6: Arranjo experimental do interrogador utilizado para as medições

Nota: Lasers nesta faixa de potência podem ser perigosos e causar danos à visão. Cuidados especiais devem ser adotados para intervenções no arranjo.

3.3.2 Descrição dos módulos e componentes

A fonte laser utilizada no experimento foi o modelo Rio Orion da empresa REDFERN, cuja potência de saída medida foi de 10,48 mW. A largura de linha especificada é de 5 kHz e o laser foi operado num comprimento de onda próximo de 1549,64 nm. Para acoplamento do laser aos moduladores EOM1 e EOM2 foi utilizado um divisor 50:50 da empresa JDSU. O divisor apresentou um desequilíbrio de apenas 0,11 dB entre as saídas. Antes de cada modulador foram usados controladores de polarização tipo "padle", com três elementos cada.

Como modulador EOM1 foi utilizado o modelo LN56S-FC (Thorlabs), do tipo “zero chirp”, com largura de banda de 10 GHz. A perda de inserção de EOM1 medida foi de 5,9dB, incluindo-se as conexões e adaptadores. Este modulador apresentou melhor comportamento com os pulsos de controle aplicados na entrada de polarização, ao invés da entrada de RF. Neste caso, foi acrescentado um resistor de 50 Ohms em paralelo com esta entrada para padronizar as impedâncias. Para levar o modulador à condição de mínimo sinal de saída, é necessária a aplicação de um potencial de aproximadamente 5,9V (positivos ou negativos) na sua entrada. O gerador de pulsos utilizado foi o modelo 4052 da BK Precision, que fornece sinais com amplitude máxima de 5 V (com carga de 50 Ohms). O gerador que esta sendo usado anteriormente, fornecia sinais de pouco mais de 2 Volts apenas. Para adequação com os níveis requeridos na entrada do modulador EOM1, foi desenvolvido um circuito amplificador especial. O amplificador apresenta banda útil de DC até cerca de 100 MHz, e um "slew rate" de 7300 V/ μ s para garantir transições rápidas. O diagrama eletrônico e os detalhes construtivos do amplificador são apresentados no APÊNDICE A.

O amplificador óptico (EDFA) utilizado foi um modelo de bancada da KEOPSYS, série CEFA-C-PB-HP, com faixa de entrada de -20 dBm a 0 dBm (corte de sinal abaixo de -20 dBm) e saída ajustável de até 33dBm. O amplificador foi verificado com potências contínuas de -18 dBm e de -1 dBm em sua entrada, com a saída ajustada para 15 dBm, e não apresentou alterações espectrais observáveis mantendo um nível de ruído muito baixo nos dois casos.

Como modulador EOM2 foi usado o modelo LN81S-FC (Thorlabs), que apresenta resposta estendida até os 20 GHz. Para geração do sinal modulante de EOM2 foi utilizado um gerador de SHF modelo 2440C da Giga-tronix, com faixa de 10 MHz a 40 GHz. A polarização de EOM2 foi aplicada a partir de uma fonte de tensão ajustável. O espectro obtido da luz modulada na saída do EOM2, com a portadora e sem a portadora, é ilustrado na figura 3.7. A máxima supressão da portadora foi conseguida com uma tensão de polarização de -1,5 V na entrada do EOM2. Este baixo valor se deve a um desequilíbrio observado no modulador, que produz máxima saída com uma tensão de polarização de +4,4 V, e não com zero Volts, como seria esperado. Na condição de máxima saída, a perda de inserção medida de EOM2 foi de 5,32 dB, incluindo-se as conexões.

a) sem polarização

b) com polarização

Figura 3.7: Espectro de frequências normalizado obtido na saída do modulador EOM2

A intensidade do sinal de prova foi controlada por meio do ajuste da amplitude do sinal fornecido pelo gerador de SHF, dispensando-se o atenuador óptico neste experimento.

O isolador óptico utilizado foi também um modelo da JDSU, que apresentou perda de inserção próxima de 1dB. Como elemento sensor distribuído foi empregada uma fibra óptica monomodo tipo SSMF, fabricada pela Prysmian Fibras Óticas Brasil,

com comprimento total de 4,945 km, que apresentou índice de refração de 1,48 e perda de 0,2 dB/km. Na posição do circulador C foi utilizado um componente também fabricado pela JDSU. As perdas medidas no circulador foram de 2,25 dB no sentido de bombeio (porta 1 para porta2), e de 4,5dB no sentido de retorno (porta 2 para porta3), incluindo-se as conexões.

Para a supressão das componentes anti-Stokes foi usado uma Rede de Bragg (FBG) com largura de banda de 50 GHz e frequência central de 193,5 THz @ 69,3°C. Para o correto posicionamento da curva de resposta do FBG em relação ao espectro Brillouin da fibra de teste, o mesmo foi acomodado num compartimento com temperatura controlada. O módulo controlador foi implementado com base nas ações de controle proporcional e integral (PI), empregando elementos Peltier associados em cascata para permitir o alcance das temperaturas necessárias. Os detalhes do módulo e do controlador de temperatura são descritos no APÊNDICE A.

A atenuação conseguida com o FBG na frequência da banda lateral superior (USB) foi de aproximadamente 21 dB, enquanto que as perdas impostas na banda lateral inferior (LSB), que são as frequências de interesse, foi de apenas 3 dB, incluindo-se os cabos. A figura 3.8 ilustra o espectro do sinal após o FBG, com as componentes anti-Stokes já suprimidas.

Figura 3.8: Espectro de frequências medido na saída do FBG

O fotodetector foi construído com base no fotodiodo FGA10 da Thorlabs e apresentou resposta em frequência de DC a 25 MHz (+/-3 dB), com sensibilidade de

$12,5 \times 10^3$ V/W. O circuito eletrônico e os detalhes construtivos do fotodetector são apresentados no APÊNDICE A. Este módulo foi providenciado em substituição a um modelo da Newfocus que estava sendo utilizado e que apresentou defeito.

Como sistema de aquisição de dados foi utilizado um osciloscópio Tektronix modelo TBS1052B, o que facilita a visualização e a captura dos sinais usando-se os recursos nativos do instrumento como médias de leituras, etc.

A foto da figura 3.9 ilustra o arranjo completo do experimento montado em bancada.

Figura 3.9: Arranjo completo do experimento montado em bancada

3.3.3 Instrumentos e Recursos

Os principais itens utilizados na montagem do arranjo e na realização dos diversos testes e medições, assim como a sua disponibilidade, encontram-se listados na tabela 3.2.

Tabela 3.2: Lista dos principais instrumentos itens e recursos

ITEM	DESCRIÇÃO	QT	CEDENTE
1	Modulo Laser - Modelo Rio Orion - Redfern 1.55 um/10 mW	1	USP
2	Modulador de intensidade LN81S-FC - 20 GHz - THORLABS	1	USP
3	Modulador de intensidade LN56S-FC 10 GHz - THORLABS	1	UNICAMP
4	Isolador óptico com rabichos - JDSU	1	Pesquisador
5	Circulador óptico 1525 – 1610 nm, - JDSU	1	Pesquisador
6	Acoplador óptico 1x2 50:50	1	Pesquisador
7	Controlador de polarização	2	UNICAMP
8	Fotodetector DC – 25 MHz	1	Pesquisador / USP
9	Amplificador Óptico (EDFA) KEOPSYS - CEFA-C-PB-HP	1	UNICAMP
10	Fibra óptica Prysmian modelo SSMF - Rolo com 4,945 km	1	Pesquisador
11	Cabos ópticos e conectores FC/PC e SC/APC	8	Pesquisador
11	Rabichos com conector SC/APC	15	Pesquisador / USP
12	FBG – banda: 50GHz; frequência: 193,5 THz @ 69,3°C	1	Pesquisador
13	Módulo Controlador de temperatura PI (FBG)	1	Pesquisador
14	Gerador de SHF Giga-Tronix 2440C – 10 MHz a 40 GHz	1	USP
14	Gerador de Pulsos BK Precision modelo 4052	1	USP
16	Analizador de Espectro Óptico Anritsu modelo MS9710B	1	USP
17	Osciloscópio digital de 50 MHz – Tektronix - TBS1052B	1	USP
18	Multímetro digital de 3 ½ dígitos	1	Pesquisador
19	Fontes de alimentação simétrica de 0 a 30 V + 5 V	1	USP
20	Bancada para montagem e testes do arranjo	1	USP
21	Ferramentas para clivagem e fusão de fibras	1	USP
22	Giga de teste especial para simulação das intrusões	1	Pesquisador
23	Amplificador de banda larga DC a 100 MHz – 7300 V/us	1	Pesquisador
24	Microscópio óptico para inspeção de conectores	1	UNICAMP
25	Medidor de potência óptica	1	USP
26	OTDR Fluke	1	USP
27	Notebook + softwares aplicativos	1	Pesquisador / USP

Como não houve apoio financeiro para o desenvolvimento do projeto, para viabilizar a realização dos experimentos contou-se com o uso da infraestrutura e recursos laboratoriais disponíveis na Escola de Engenharia de São Carlos - USP, complementados com recursos particulares do próprio pesquisador e alguns instrumentos conseguidos da UNICAMP como empréstimo.

3.3.4 Espectro do ganho Brillouin

A caracterização da curva espectral do ganho Brillouin da fibra de teste é importante para o correto ajuste da frequência do sinal de prova, assim como para a melhor interpretação dos sinais observados. Para a sua obtenção foi empregado um método relativamente simples, usando-se o próprio arranjo do interrogador. A entrada do modulador EOM1 foi desconectada do gerador de pulsos, de forma a proporcionar um sinal de saída com amplitude constante e com a maior intensidade possível. A intensidade medida na saída do modulador ficou próxima de 0 dBm. A saída do amplificador óptico foi ajustada para 16 dBm e a saída do gerador SHF para 20 dBm, aproximadamente. A frequência do gerador foi varrida numa faixa de valores ligeiramente abaixo e acima da frequência de ressonância da fibra. O sinal lido na saída do circulador C é máximo quando a frequência da banda lateral inferior coincide com a componente Stokes (ressonância), diminuindo à medida em que se distancia desta. A medida dos sinais Brillouin foram feitas com auxílio do Analisador de Espectro Óptico, conectado em lugar do Fotodetector. As leituras foram tomadas com 110 valores diferentes de frequência, em passos de 1 MHz, à temperatura ambiente de 22 °C.

A tabela 3.3, a seguir, apresenta os valores de amplitude relativa obtidos das medições.

Tabela 3.3: Valores relativos do ganho Brillouin x Frequência da fibra de teste

F (GHz)	P (μ W)	F (GHz)	P (μ W)	F (GHz)	P (μ W)	F (GHz)	P (μ W)	F (GHz)	P (μ W)	F (GHz)	P (μ W)
10,650	4,57	10,671	7,05	10,692	83,20	10,713	391,00	10,734	17,67	10,755	5,41
10,651	4,65	10,672	7,42	10,693	104,20	10,714	363,00	10,735	15,85	10,756	5,27
10,652	4,72	10,673	7,74	10,694	126,60	10,715	334,00	10,736	14,35	10,757	5,15
10,653	4,78	10,674	8,12	10,695	155,00	10,716	315,00	10,737	13,15	10,758	5,02
10,654	4,84	10,675	8,55	10,696	189,40	10,717	280,00	10,738	12,14	10,759	4,93
10,655	4,91	10,676	9,08	10,697	220,00	10,718	247,00	10,739	11,18	10,760	4,87
10,656	4,97	10,677	9,57	10,698	255,00	10,719	210,00	10,740	10,17	10,761	4,76
10,657	5,04	10,678	10,30	10,699	293,00	10,720	176,00	10,741	9,51	10,762	4,68
10,658	5,16	10,679	11,20	10,700	322,10	10,721	148,00	10,742	8,85	10,763	4,61
10,659	5,22	10,680	12,31	10,701	342,50	10,722	124,00	10,743	8,46	10,764	4,55
10,660	5,33	10,681	13,67	10,702	372,90	10,723	103,40	10,744	7,99	10,765	4,50
10,661	5,43	10,682	15,20	10,703	401,00	10,724	81,76	10,745	7,77	10,766	4,44
10,662	5,51	10,683	17,00	10,704	427,10	10,725	68,65	10,746	7,44	10,767	4,37
10,663	5,61	10,684	19,60	10,705	439,10	10,726	56,56	10,747	6,99	10,768	4,33
10,664	5,77	10,685	22,30	10,706	454,00	10,727	49,37	10,748	6,65	10,769	4,27
10,665	5,88	10,686	25,81	10,707	461,40	10,728	40,94	10,749	6,40	10,770	4,22
10,666	6,02	10,687	30,01	10,708	461,20	10,729	35,50	10,750	6,15		
10,667	6,15	10,688	36,20	10,709	460,00	10,730	30,43	10,751	5,99		
10,668	6,33	10,689	44,00	10,710	455,00	10,731	25,59	10,752	5,85		
10,669	6,57	10,690	53,70	10,711	432,00	10,732	22,30	10,753	5,61		
10,670	6,80	10,691	67,00	10,712	411,40	10,733	20,31	10,754	5,51		

Na figura 3.10 é mostrado o gráfico normalizado, traçado a partir dos mesmos valores, que representa a curva média do ganho Brillouin da fibra de teste. Pode se observar que a curva real obtida, que foi traçada sem nenhum ajuste dos dados coletados, apenas fazendo-se a normalização, é muito fiel ao formato de uma curva de Lorentz.

A partir do espectro obtido, pode-se determinar a largura de banda do ganho Brillouin da fibra de teste (-3 dB), que é de aproximadamente 20 MHz.

Figura 3.10: Espectro normalizado do ganho Brillouin obtido da fibra de teste

O índice de refração da fibra de teste, calculado a partir do comprimento e das medições de tempo feitas com o osciloscópio, é de aproximadamente 1,48.

3.3.5 Limiar de Espalhamento Estimulado

A determinação do limiar de espalhamento Brillouin estimulado da fibra de teste não é crítica para o funcionamento do interrogador, contudo, o seu conhecimento é importante para melhor caracterizar a fibra de teste e escolha do ponto de operação do sistema. A determinação do limiar de espalhamento estimulado pode ser feita de maneira simples, comparando-se a potência dos sinais Brillouin refletidos com a potência entregue no final da fibra. A figura 3.11 apresenta um arranjo genérico utilizado para estas medições, onde MP é o medidor de potência óptica. O Limiar de Espalhamento Estimulado Brillouin é o ponto onde as duas potências se equivalem. As medições podem ser feitas tanto com uso de um medidor de potência óptica portátil como com um analisador de espectro óptico.

Figura 3.11: Arranjo sugerido para medição do Limiar Brillouin Estimulado

No caso do experimento, o Limiar Brillouin Estimulado da fibra de teste foi determinado teoricamente, já que o comprimento da fibra é pequeno (~5 km), o que implica num limiar relativamente alto e mais difícil de ser medido com os recursos disponíveis. Houve também a preocupação de não provocar danos aos componentes ópticos com a injeção de sinais com potências médias excessivamente altas. O procedimento do cálculo é descrito a seguir.

Conforme apresentado no capítulo 2, a potência crítica, ou Limiar Brillouin Estimulado da fibra pode ser calculado a partir da equação aproximada (2.24):

$$P_{th} \approx \frac{21bA_{eff}}{g_B L_{eff}} \quad (2.24)$$

O comprimento efetivo da fibra de teste foi calculado a partir da equação (2.19), conforme segue:

$$L_{eff} = [1 - e^{-\alpha L}]/\alpha \text{ (km)} \quad (2.19)$$

Considerando o coeficiente $\alpha = 0,045$, que equivale à atenuação da fibra de teste de 0,2 dB/km, temos que: $L_{eff} = 4,43$ km. Considerando a área efetiva A_{eff} da fibra monomodo como $50 \mu\text{m}^2$, que é um valor típico para fibras SSMF operando em

1,55 μm , e o valor do ganho Brillouin g_B como $4 \cdot 10^{-11}$ m/W, para o comprimento de onda utilizado, fazendo-se $b = 1$, temos:

$$P_{th} = 5,92 \text{ mW}$$

Com o termo $b = 2$, temos:

$$P_{th} = 11,84 \text{ mW}$$

Para as medições feitas no experimento, a saída do amplificador óptico (EDFA) foi ajustada para 15 dBm. Mesmo considerando as perdas no circulador C mais conectores, que foram de aproximadamente 2,25 dB no total, a potência dos sinais de bombeio injetados na fibra ficou acima destes valores, conforme deveria ser de acordo com a teoria do SBS apresentada.

3.3.6 Simulações de intrusão

Como não se dispõe de uma instalação real, as respostas do sistema foram avaliadas com a aplicação de estímulos em pontos definidos da fibra, para simular as diversas situações de intrusão. Para introdução de estímulos controlados num pequeno trecho da fibra, foi construída uma giga de teste especial conforme ilustrado na foto da figura 3.12. A giga foi construída com dois conjuntos de polias montadas sobre rolamentos, espaçados entre si de maneira a acomodar aproximadamente 10 m de fibra. Uma das extremidades da fibra foi fixada à estrutura, sendo a tração de teste aplicada na extremidade oposta. O atrito reduzido das polias favorece a distribuição uniforme da tensão mecânica no trecho estimulado. Uma escala graduada foi prevista para permitir a calibração das deformações (elongações) induzidas, conforme ilustrado na figura 3.13.

Figura 3.12: Giga de teste construída para as simulações de intrusão com a fibra já instalada

O restante da fibra, de um total de 4,945 km, foi subdividido em 2 trechos, um de 0,244 km e outro de 4,692 km, que foram combinados de modo a ter o ponto médio da giga inserido nas posições $z=0,249$ km, $z=4,697$ km e $z=4,940$ km. A figura 3.13 ilustra uma destas configurações com a giga de teste entre os dois trechos. Deve ser considerada uma tolerância de aproximadamente 2 metros nas posições determinadas, por conta dos diferentes arranjos de cabos e conectores necessários para interligação dos trechos. Há também um pequeno trecho adicional na giga de testes, além dos 10 metros estimulados, que não foi considerado.

Figura 3.13: Detalhes da giga de testes inserida entre trechos.

As intrusões foram simuladas com a aplicação de distúrbios de $100\ \mu\epsilon$, $200\ \mu\epsilon$, $300\ \mu\epsilon$, $500\ \mu\epsilon$ e $1000\ \mu\epsilon$ (elongação). A título de nota, elongações de até $10000\ \mu\epsilon$ (1%) são normalmente suportadas por fibras de sílica, sem a ocorrência de danos. Não foram utilizadas elongações menores que $100\ \mu\epsilon$ neste experimento, pela dificuldade prática de se calibrar com precisão a magnitude dos mesmos.

Mais detalhes sobre a construção da giga de testes são ilustrados no APÊNDICE A.

3.3.7 Aquisição de dados

O sinal de saída do fotodetector FD1, após passar pelo filtro constituído pelo FBG, foi conectado à entrada vertical do osciloscópio, sendo a varredura horizontal disparada pelo gerador de pulsos. As reflexões de cada ponto da fibra chegam em tempos diferentes, de modo que eixo horizontal pode ser convertido numa escala

linear de distâncias, z , sendo os pontos mais próximos a $z=0$, mostrados à esquerda na tela e os mais distantes à direita. Como este modelo de osciloscópio não dispõe de recursos de varredura retardada, para que fosse possível visualizar detalhes de regiões específicas do sensor, optou-se por fazer o disparo através do segundo canal do gerador de pulsos. Neste caso, o atraso desejado pode ser controlado facilmente por meio da fase ou da largura dos pulsos deste canal. Ajustando-se adequadamente a taxa de varredura horizontal e a sensibilidade do eixo vertical do osciloscópio, obtém-se uma curva de resposta semelhante à mostrada na figura 3.14, que representa as reflexões da fibra ao longo da extensão de 4,945 km.

Figura 3.14: Sinais Brillouin refletidos da fibra de teste

As deflexões no eixo vertical representam a intensidade dos sinais Brillouin em cada ponto da fibra. As variações de amplitude registradas se devem principalmente às mudanças na polarização relativa ao longo do sensor. A inclinação da curva mostrada se deve aos fatores descritos em 3.2.3, aqui um pouco mais acentuada pelo fato de se estar trabalhando com potências mais baixas, havendo maior variação no SBS.

Antes de se iniciar as coletas de dados foi aguardado um tempo de cerca de duas horas, para a estabilização da temperatura dos instrumentos e acomodação do sistema. Durante todos os testes e coletas de dados realizados, o sistema foi mantido com os seguintes ajustes:

- Comprimento de onda do Laser: 1549,64 nm
- Potência média na entrada do EDFA: -16 dBm +/- 2 dBm
- Potência de pico na entrada do EDFA: -1 dBm +/- 1 dBm
- Potência de Saída do EDFA: 15 dBm
- Frequência de bombeio: 20 kHz
- Frequência do Gerador de SHF: 10,707 GHz
- Amplitude na saída do Gerador de SHF: 10 dBm
- Amplitude do sinal de prova (LSB): 3,645 μ V
- Temperatura do FBG: 73,2 °C
- A temperatura ambiente da sala: 22 °C.
- Controladores de polarização: Ajustados para máximo sinal

A temperatura do FBG foi ajustada com auxílio de um Analisador de Espectro Óptico, de modo a posicionar adequadamente a curva de resposta para supressão das componentes Brillouin anti-Sokes, sem interferir na detecção dos sinais Stokes.

As medições foram tomadas usando pulsos de bombeio com duração de 100 ns e de 50 ns. A frequência de repetição dos pulsos foi fixada em 20 kHz, cujo período é ligeiramente maior que a duração das reflexões da fibra de teste, evitando-se assim a sobreposição dos sinais.

Como a relação de ciclo do sinal de bombeio é muito baixa, por conta dos pulsos estreitos, o seu valor médio também resulta muito baixo. Para atingir o limiar de operação do EDFA, de -20 dBm, foi necessário elevar o patamar entre os pulsos de luz para um valor diferente de zero, de modo a produzir um valor médio suficiente para manter o amplificador óptico sempre habilitado. Para levar o modulador EOM1 à condição de mínimo sinal entre os pulsos de bombeio, que seria o ponto de trabalho ideal, é necessário manter a entrada de modulação no potencial de +5,9 V ou -5,9 V. No experimento, trabalhou-se com o valor de base entre pulsos de -5,5 V, o que resulta num sinal óptico com valor médio de cerca de -16 dBm na saída do modulador, nível suficiente para habilitar o EDFA. Na figura 3.15 são mostrados os formatos dos pulsos de 100 ns e 50 ns, aplicados ao modulador, com os respectivos níveis de tensão.

Esta exigência do EDFA implica na geração de ruídos, conforme discutido no subitem 4.3.

a) 100 ns

b) 50 ns

Figura 3.15: Pulsos de tensão aplicados ao modulador EOM1; a) 100 ns; b) 50 ns

As respostas do sistema foram gravadas a partir do próprio osciloscópio. Cada arquivo de dados contém 2500 amostras, que corresponde à resolução horizontal oferecida pelo instrumento. No caso do experimento, considerando que o comprimento da fibra de teste é próximo de 5 km, esta resolução significa uma amostra de sinal para cada 2 m de fibra, aproximadamente.

Para cada condição de teste foram tomados três grupos de arquivos; um com a base de tempo ajustada para 5 $\mu\text{s}/\text{DIV}$, que mostra na tela o comprimento total do sensor, outro com a base de tempo em 500 ns/DIV , para mostrar mais detalhes do sinal de intrusão, e outro com 100 ns/DIV que representa um nível de ampliação ainda maior. No total, foram gravados 168 arquivos de dados.

Para redução dos ruídos aleatórios, em todas as medições, foi utilizado a média de 128 leituras feita no próprio osciloscópio. Como o instrumento faz poucas varreduras por segundo quando realizando cálculos, apesar do bombeio estar sendo feito com 20 kHz, antes de gravar cada arquivo foi necessário esperar cerca de 10 a 15 segundos para que os valores se aproximassem da tendência para $t=\infty$. Vale lembrar que para cada nova varredura, os algoritmos de média móvel precisam ser executados para os 2500 pontos, o que justifica a maior lentidão nas aquisições.

As resolução vertical oferecida pelo osciloscópio é de 8 bits.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Comentários

Devido a natureza do experimento e ao espaço reduzido do laboratório, naturalmente não é possível ter o sensor linearmente distribuído e uniformemente instalado como seria numa aplicação prática real. A fibra de teste foi mantida em bobinas, onde a forma das espiras e a tensão mecânica residual não são regulares. Além disso, alguns trechos tiveram que ficar expostos na bancada para as manobras de conexão, etc. Nesta situação a polarização dos sinais sofrem mudanças, sendo bastante afetada pelo posicionamento dos rolos e pela distribuição da fibra. Em função destes dois fatores, principalmente, a curva de resposta na saída do fotodetector apresenta desvios sistemáticos em relação à curva teórica esperada, apresentando picos e vales. Para cancelar os efeitos dessas influencias e tornar mais fácil a visualização dos eventos, lançou-se mão de um artifício matemático. Para cada condição de teste foi primeiramente obtida a curva de base, sem excitação do sensor. Em seguida, foram obtidas as curvas de resposta para cada valor de excitação, sendo posteriormente subtraída a curva de base correspondente. A resposta resultante toma a forma de um gráfico mais horizontalizado, com os sinais de intrusão aparecendo em forma de picos negativos, como no gráfico original. Esta prática dá muito bons resultados e pode ser generalizada mesmo para condições de instalação mais favoráveis.

Para redução dos ruídos aleatórios, todos os sinais gravados foram obtidos a partir da média de 128 amostragens, feita no próprio osciloscópio.

4.2 Detecção das intrusões simuladas

Os sinais obtidos com estímulo de $100\ \mu\text{E}$, que são os piores casos, são apresentados nas figuras 4.1 a 4.3, com as curvas de base já subtraídas.

Figura 4.1: Sinais de intrusão detectados com estímulo na posição 0,249 km

Figura 4.2: Sinais de intrusão detectados com estímulo na posição 4,697 km

Figura 4.3: Sinais de intrusão detectados com estímulo na posição 4,940 km

Os gráficos de resposta com estímulos mais intensos são mostrados abaixo, para o ponto 0,249 km.

Figura 4.4: Sinais de intrusão detectados do ponto 0,249 km, com diferentes estímulos

Nos tópicos a seguir são apresentadas as análises e comentários sobre esses resultados.

4.3 Sensibilidade de detecção

A sensibilidade de detecção determina a menor intensidade de eventos que podem ser detectados de maneira confiável pelo sistema. Não deve ser confundida com a sensibilidade à excitações, que traduz a magnitude das respostas em relação

à intensidade dos estímulos aplicados ao sensor. O sistema foi testado com estímulos a partir de $100 \mu\epsilon$, que equivale a uma elongação de 0,01% (elongação de 1mm no comprimento de 10000 mm da giga). Não foram utilizados estímulos de menor amplitude apenas por razões práticas do experimento. Conforme mostrado nas figuras 4.1 a 4.3, mesmo com as menores elongações testadas, os sinais produzidos foram claros e perfeitamente detectáveis em todos os pontos simulados, ficando bem destacados dos níveis de ruído.

O gráfico da figura 4.4 ilustra a evolução das respostas obtidas em função da magnitude dos estímulos aplicados, para a posição 0,249 km.

Figura 4.4: Resposta do sistema à diferentes estímulos aplicados na posição 0,249 km

No gráfico, os sinais de intrusão aparecem deslocados para baixo em relação ao plano que passa pela amplitude relativa igual a zero, e que corresponde à resposta do sistema em repouso, sem excitação na fibra. A sensibilidade à excitações pode ser

estimada comparando-se a amplitude da resposta produzida com a amplitude da excitação aplicada. Pelo gráfico, fica fácil observar que a sensibilidade é maior na região inicial da curva, onde o perfil de evolução desenhado pelo pico dos sinais de intrusão aparece mais inclinado em relação ao eixo das elongações, indicando uma maior taxa de variação da amplitude de saída em função das excitações aplicadas. Para estímulos de maior amplitude, a partir de 300 μE , a curva começa a perder a inclinação, revelando uma diminuição progressiva da sensibilidade à medida em que cresce a magnitude dos estímulos aplicados. Este comportamento é o esperado, considerando-se o perfil Lorentziano da curva de ganho Brillouin. Para traçado do gráfico da figura 4.4, os valores correspondentes às excitações de 400 μE , 600 μE , 700 μE , 800 μE e 900 μE , foram interpolados a partir dos valores obtidos com excitações de 300 μE , 500 μE e 1000 μE , usando-se interpolação linear. A evolução das respostas para os outros pontos apresenta comportamento equivalente, portanto foi omitida a apresentação dos demais gráficos.

O ganho Brillouin é sensível à polarização relativa entre os sinais de bombeio e de prova no ponto de interação, portanto, para a mesma excitação os sinais gerados podem variar em amplitude. Nas simulações procurou-se conseguir uma polarização mais favorável, por meio do reposicionamento da fibra, contudo isto não foi possível em todas as situações.

Conforme pode ser observado nas figuras 4.1 a 4.3, os sinais detectados dos pontos mais distantes mostram uma pior relação sinal/ruído, em comparação aos detectados das simulações feitas próximo ao início da fibra. Estas diferenças se devem em parte à atenuação do sinal de intrusão, mas, principalmente aos ruídos de polarização, que não são totalmente eliminados. Outra contribuição para os ruídos advém de uma característica do amplificador óptico utilizado no experimento. Para manter o amplificador habilitado, foi necessário elevar o patamar de sinal entre os pulsos de bombeio para um nível ligeiramente acima de zero, e assim obter o valor médio requerido, acima dos -20 dBm. Obviamente, o nível de base também é amplificado pelo EDFA, fazendo com que a luz de bombeio não seja totalmente cortada entre os pulsos de alta potência. Embora tendo amplitude muito menor, este nível contínuo residual também gera espalhamento, de maneira simultânea em toda

a fibra, e que se manifesta em forma de ruído sobreposto aos sinais localizados. Este foi um dos fatores limitantes da sensibilidade de detecção neste experimento.

As influências descritas ficam ainda mais evidentes com pulsos de bombeio de 50 ns.

Com um sensor linearmente disposto, com polarização mais uniforme, e com o sinal de bombeio totalmente cortado entre os pulsos de alta potência, os ruídos tendem a ser bem menores. Um randomizador de polarização também poderia ser incorporado ao sistema para auxiliar no cancelamento dos efeitos produzidos, fazendo-se a média de várias leituras.

Considerando as limitações mencionadas, as características do sistema de aquisição de dados utilizado e as condições gerais do experimento, estes resultados podem ser considerados como muito bons. Com base nas respostas aos testes práticos, estima-se que com poucas correções e melhoras no sistema de aquisição de dados e no processamento dos sinais, seja possível a detecção confiável de eventos com amplitudes muito menores que as testadas. Isto torna o método muito promissor e adequado ao propósito de detecção de intrusão.

4.4 Localização dos eventos

Como apresentado em 3.2.3, a resolução de medida em sistemas BOTDA está diretamente relacionada com a duração dos pulsos de bombeio que, combinada com a velocidade de propagação da luz na fibra, define o tamanho da porção do sensor que está sendo simultaneamente excitada. Pulsos mais estreitos favorecem a resolução espacial, mas, por terem menos energia e espectro mais largo, geram menos espalhamento Brilluouin e pioram a relação sinal/ruído, dificultando a identificação dos sinais de intrusão. Pulsos mais largos favorecem a relação sinal/ruído, porém, pela sua maior duração, tendem a mostrar os sinais mais distribuídos, piorando a resolução espacial.

Por limitações dos instrumentos, neste experimento trabalhou-se apenas com larguras de pulso de 100 ns e de 50 ns. Considerando que o índice de refração típico das fibras monomodo é próximo de 1,5, estas larguras propiciam resoluções de medida da ordem de 10 m e 5 m, respectivamente.

Nos dois casos foi possível detectar e localizar exatamente o ponto de aplicação dos estímulos, estando coerentes com as distâncias físicas reais. Com pulsos de bombeio de 50 ns, mesmo que com menor intensidade e pior relação sinal ruído, os picos gerados pelas intrusões simuladas se mostram mais estreitos e mais definidos. Com pulsos de 100 ns os sinais gerados são bem mais intensos e com melhor relação sinal ruído, porém aparecem levemente mais distribuídos no eixo de distâncias, estando coerente com a teoria. A resolução limitada de 2500 pontos por varredura imposta pelo osciloscópio, também influi na definição dos eventos detectados. No caso do experimento, esta resolução significa aproximadamente uma amostra para cada 2 metros de sensor. Em parte, a definição dos sinais de intrusão também ficou levemente afetada pela largura de banda do fotodetector utilizado, de apenas 25 MHz, que resulta numa discreta suavização das transições e num pequeno atraso na fase dos sinais. Contudo, dada a pequena escala destas influencias, isto não compromete a avaliação do método.

A escolha da duração mais adequada para os pulsos de bombeio dependerá sempre das características da aplicação, mas, considerando que a resolução espacial não é o requisito mais crítico num sensor distribuído de longa distância, pode-se dar preferência a pulsos de bombeio mais largos em benefício da qualidade dos sinais e da sensibilidade de detecção.

4.5 Tempo de detecção

O tempo para detecção de um evento pelo sistema corresponde ao tempo necessário para obtenção de uma leitura que permita para a sua identificação confiável, seja de maneira automática ou manual. Em sistemas distribuídos o tempo requerido para aquisição dos sinais e detecção dos eventos depende de alguns fatores como, comprimento do sensor, quantidade de pontos amostrados, taxa de varredura, resolução de medida, quantidade de leituras requeridas para formar a média, e a capacidade de processamento associada. Tomar a média de muitas leituras é um dos artifícios usualmente empregados em sensores distribuídos, como meio para reduzir os ruídos aleatórios normalmente presentes nos sinais refletidos. Neste experimento trabalhou-se com a média de 128 leituras, que é o limite oferecido

pelo osciloscópio, já que não se contou com um sistema externo de processamento em tempo real. O tempo para se atingir um valor razoavelmente próximo da média das últimas 128 leituras foi em torno de 15 segundos. É importante frisar que este tempo relativamente longo não está associado ao método, mas sim ao instrumento usado para as leituras. Com melhores recursos para aquisição e processamento dos dados, esta mesma média poderia ser facilmente obtida em uma pequena fração de segundo, extraíndo mais benefícios do arranjo. Com um sistema rápido de aquisição de dados, pode-se trabalhar com mais pontos de amostragem e também aumentar o número de leituras considerado nas médias, o que melhora muito a qualidade dos sinais e favorece a detecção de eventos com magnitudes muito menores que as testadas. O tempo de detecção ficaria ainda abaixo da casa de um segundo. Em alguns casos, dependendo da aplicação e do comprimento do sensor, podem ser requeridas milhares de leituras para se chegar a um sinal suficientemente limpo.

Mesmo com a média de um número limitado de leituras, os sinais detectados no experimento foram bem repetitivos e claros, possibilitando a fácil distinção dos eventos de intrusão.

4.6 Considerações sobre Interferências térmicas

Como discutido, os sensores distribuídos baseados no efeito Brillouin são sensíveis à deformações mecânicas e também à temperatura. Considerando que o propósito do sistema é a detecção de intrusão, que são perturbações mecânicas induzidas e restritas ao ponto de intrusão, é preciso discriminar as sensibilizações produzidas por variações térmicas. Felizmente, num sensor bem instalado, a temperatura tende a ser mais suavemente distribuída, raramente apresentando mudanças localizadas ou variações expressivas entre pontos vizinhos na fibra. Desta maneira, a sua influencia não compromete a detecção de intrusões com o presente método. Também é possível praticamente eliminar a sua influencia por meio da resintonia do sistema, sempre que houver mudanças apreciáveis na temperatura ambiente, como por exemplo as que ocorrem entre o dia e a noite, ou em função das estações do ano. A sintonia ótima do sistema pode ainda ser mantida de maneira automática, com o acréscimo de um algoritmo de controle.

5 CONCLUSÕES

5.1 Desempenho do método

Mesmo nas condições limitadas de um ambiente de laboratório, que restringem a gama de testes que poderiam ser feitos num sistema como este, os resultados obtidos dos experimentos são muito promissores e não deixam dúvidas quanto a aplicabilidade do método para fins de detecção de intrusão. Mesmo estímulos de baixa magnitude como 0,01%, produziram sinais claros e inequívocos que permitiram detectar e localizar os eventos simulados a quilômetros de distância. O tempo de detecção neste caso foi limitado pelo osciloscópio que, quando realizando cálculos, executa poucas varreduras por segundo. Com um sistema rápido de aquisição e processamento dos dados, pode-se aumentar o número de pontos de amostragem e também aumentar o número de leituras que compõe a média, o que melhora muito a qualidade dos sinais e favorece a detecção de eventos de mais baixa amplitude. O tempo de detecção ficaria ainda mantido abaixo da casa de um segundo. Com melhorias no sistema de aquisição de dados e ferramentas de software dedicadas para o processamento dos sinais, as informações também podem ser exibidas ao usuário com muito mais qualidade e riqueza de detalhes, facilitando as interpretações. O potencial de utilização do método pode ser estendido para muito além das condições aqui testadas prestando-se a um grande número de aplicações.

O desempenho do interrogador apresentado pode ser considerado como bastante satisfatório para os objetivos propostos.

5.2 Sugestões para futuros trabalhos

A seguir são sugeridas algumas melhorias e complementos que poderiam ser agregados para se tirar um melhor proveito do método e favorecer a sua utilização prática. Um dos pontos de melhoria é certamente o sistema de aquisição de dados, pelo seu impacto no sistema. A utilização de um sistema de aquisição mais rápido,

com mais pontos de amostragem por varredura e com maior resolução de medida, pode contribuir em muito para melhorar ainda mais a qualidade dos sinais e permitir a observação de eventos mais discretos. Para melhorar a filtragem dos ruídos e obter sinais mais limpos, também recomenda-se trabalhar com média de um maior número de leituras, o que não é problema com bons recursos de computação. Também poderia ser incluído um algoritmo de sintonia automático, para compensar os efeitos térmicos e manter o sistema sempre no melhor ponto de funcionamento. Usar um monitor grande e com boa resolução de imagem também é crucial para facilitar a visualização dos eventos. Para exibição dos sinais com mais detalhes, o gráfico apresentado pode ainda ser subdividido em trechos, de modo a facilitar a identificação e a localização dos eventos. A inclusão de algoritmos de detecção e localização automáticos também pode ser um bom acréscimo a ser considerado. Sensores com maior comprimento e com diferentes condições de instalação também poderiam ser testados para se obter uma avaliação em condições mais reais. Um estudo de campo para investigar as amplitudes dos estímulos produzidos no sensor de acordo com o tipo de instalação e natureza das intrusões a serem detectadas, também é de muita valia para se caracterizar as aplicações onde o método pode ser empregado com melhores resultados.

A utilização de um amplificador óptico com corte de sinal para níveis de entrada baixos foi apenas por motivo de disponibilidade, mas deve ser evitada pelas implicações descritas.

REFERÊNCIAS

AGRAWAL, G.P. **Fiber-optic communication systems**. 3rded. Rochester: Wiley-Interscience, 2002.

APPLICATIONS of fiber optic distributed strain and temperature sensors. Disponível em:<http://www.ozoptics.com/ALLNEW_PDF/APN0008.pdf>. Acesso em: 10 jan, 2016.

BAO, X.; CHEN, L. Recent progress in brillouin scattering based fiber sensors. **Sensors**, v.11, n.4, p.4152-4187, 2011.

BARNOSKI, M.K. et al. Optical time domain reflectometer. **Applied Optics**, v.16, n.9, p.2375-2379, Sept. 1977.

BARNOSKI, M.K.; JENSEN, S.M. Fiber waveguides: a novel technique for investigating attenuation characteristics. **Applied Optics**, v.15, n.9, p.2112-2115, Sept. 1976.

BOYD, R.W. **Nonlinear optics**. 3rded. Rochester: Academic Press, 2008.

BRILLOUIN, L.N. Diffusion de la lumiere et des rayons X par un corps transparent homogene: Influence de l'agitation thermique. **Annales des Physique**, v.17, p.88-122, 1922.

BROWN, A.W.; COLPITTS, B.G.; BROWN, K. Dark-pulse brillouin optical time-domain sensor with 20-mm spatial resolution. **Journal of Lightwave Technology**, v.25, n.1, p.381-386, Jan. 2007.

CHIAO, R.Y.; TOWNES, C.H.; STOICHEFF, B.P. Stimulated Brillouin Scattering and coherent generation of intense hypersonic waves. **Physical Review Letters**, v.12, p.592-595, May 1964.

DAKIN, J.P. Distributed optical fiber sensors. In: DAKIN, J.P.; KERSEY, A.D. **Distributed and multiplexed fiber optic sensors II**. Boston: SPIE, 1993. p.76-108. (Proceedings of SPIE 1797).

JIANG, S. et al. A Method for eliminating the impact of microwave sweeper power fluctuation in BOTDA system. **Photonic Sensor**, v.4, n.1, p.86-91, Mar. 2014.

KWON, I.B. et al. Development of fiber optic BOTDA sensor for intrusion detection. **Sensors and Actuators A**, v.101, n.1/2, p.77-84, 2002.

LEUNG, C.Y.; CHANG, I.F.; HSU, S. **Fiber optic line-sensing system for perimeter protection against intrusion**. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON OPTICAL FIBER SENSORS, INSTITUTE OF ELECTRONICS AND COMMUNICATION ENGINEERS OF JAPAN, 4., 1986, Tokyo. **Proceedings...** [S.l.:s.n.], 1986.

NIKLES, M.; THÉVENAZ, L.; ROBERT, P.A. Brillouin gain spectrum characterization in single-mode optical fibers. **Journal of Lightwave Technology**, v.15, n.10, p.1842-1851, Oct. 1997.

OHNO, H. et al. Industrial applications of the BOTDR optical fiber strain sensor. **Optical Fiber Technology**, v.7, n.1, p.45-64, Jan. 2

RUFFIN, A.B. Stimulated brillouin scattering: an overview of measurements, system impairments, and applications. In: SYMPOSIUM OF OPTICAL FIBER MEASUREMENTS, 2004. **Proceedings...** [S.l.:s.n.], 2004.

SINGH, S.P.; GANGWAR, R.; SINGH, N. Nonlinear scattering effects in optical fibers. **Progress In Electromagnetics Research**, v.PIER 74, p.379-405, 2007.

THÉVENAZ, L.; SOTO, M.A. Modeling and evaluating the performance of Brillouin distributed optical fiber sensors. *Optics Express*, v.21, n.25, p.31347-31366, 2013.

WANG, L. et al. Distributed temperature sensing using stimulated-brillouin-scattering-based slowlight. **IEEE Photonics Journal**, v.5, n.6, artigo #6801808, Dec. 2013.

ZHANG, X.; HU, J.; ZHANG, Y. A Hybrid single-end-access BOTDA and COTDR sensing system using heterodyne detection. **Journal of Lightwave Technology**, v.31, n.12, p.1954-1959, June 2013.

ZOU, L.; BAO, X.; CHEN, L. Simultaneous distributed Brillouin strain and temperature sensor with photonic crystal fiber. In: UDD, E.; IINAUDI, D. **Smart structures and materials 2004: smart sensor technology and measurement systems**. San Diego: SPIE, 2004. p.13-17. (Proceedings of SPIE 5384

O layout foi elaborado em face simples, e o aspecto da placa de circuito impresso já montada é mostrado na figura 2.

Figura 2: Aspecto da placa de circuito impresso montada

Para facilidade de manuseio e conexões, a placa foi temporariamente suportada numa base provida de conectores, como mostrado na figura 3.

Figura 3: Aspecto do módulo amplificador como usado no experimento

O ganho de tensão foi definido para aproximadamente 2,5, quando com carga de 50 Ohms. Para este valor de ganho, o amplificador apresenta uma banda útil de DC até cerca de 100 MHz, e é capaz de entregar sinais com amplitudes acima de 12 Vpp sem distorção apreciável. Na figura 4 é mostrada a resposta do amplificador para

um sinal quase retangular com frequência de 25 MHz e tensão de saída de 24 Vpp (neste caso, sem carga). Apesar da alta frequência e da elevada amplitude do sinal de saída, pode-se observar que praticamente não há distorção no formato do sinal. O atraso de fase verificado também é muito pequeno, como é característico de circuitos de alta velocidade.

Figura 4: Resposta a um sinal de 25 Mhz com amplitude de saída de 24 Vpp

Nos testes de laboratório foram utilizadas larguras de pulso de 50 ns e 100 ns. O formato e níveis dos sinais de pulso na saída do amplificador, aplicados à entrada do modulador EOM1, são apresentados no corpo da dissertação.

2 Fotodetector

O fotodetector original da Newfocus que estava sendo utilizado no experimento apresentou defeito, e foi necessária a construção de um substituto para possibilitar a continuidade dos trabalhos. O projeto do fotodetector foi desenvolvido com base no fotodiodo FGA-10, da Thorlabs e no amplificador operacional LTC6268 da Linear Technologies. O LTC6268 é um amplificador de banda larga, apresentando um produto ganho x banda de 500 MHz, com entradas FET e baixíssima corrente de polarização, da ordem de 3 fA. O LTC6268 foi usado como um amplificador de

transcondutância, com ganho definido em 5,65 kOhms. O diagrama eletrônico do módulo fotodetector é mostrado na figura 5.

Figura 5: Diagrama eletrônico do fotodetector

Para evitar que a capacitância inerente às cargas externas seja acoplada à saída do LTC6268, o que poderia levar à sua instabilidade, foi empregado um LT1806 como buffer de saída, com ganho de tensão de 2,2. Para redução da capacitância da junção, o fotodiodo foi polarizado reversamente com uma tensão de referência de 2,5 V, dotada de filtros adequados.

O com layout foi elaborado em face simples e o circuito foi montado com tecnologia SMD (mesmo para os componentes PTH) e acomodado num compartimento de alumínio usinado. O aspecto do conjunto montado, com a caixa aberta, é mostrado na figura 6.

Figura 6: Aspecto construtivo do fotodetector com a tampa removida

Considerando que a sensibilidade do fotodiodo é de 1,05 A/W, a sensibilidade final do fotodetector ficou em aproximadamente $12,5 \times 10^3$ V/W. A resposta em frequência obtida deste fotodetector é de DC até cerca de 25 MHz (± 3 dB), com pico de +3 dB em 16 MHz, o que é suficiente para o propósito do experimento.

A resposta em frequência foi avaliada usando-se o próprio arranjo do interrogador, com a aplicação de sinais modulados em amplitude para excitação do fotodetector.

3 Módulo controlador de temperatura PI

Para suprimir as componentes anti-Stokes presentes nos sinais Brillouin gerados, foi empregado um filtro baseado numa Rede de Bragg (FBG) com banda de 50 GHz e frequência central de 193,5 THz à temperatura de 69,3 °C. Para o correto posicionamento da curva de resposta do FBG em relação ao espectro Brillouin da fibra, o mesmo foi instalado num compartimento com temperatura controlada. Para isto foi necessário o desenvolvimento de um módulo controlador de temperatura. O projeto do módulo foi implementado com base nas ações de controle proporcional e integral (PI), empregando elementos Peltier associados em cascata para alcançar os

valores de temperatura necessários, acima dos 70 °C. O circuito foi baseado em amplificadores operacionais com entrada FET, para as posições mais críticas e circuitos de mais alta impedância, usando-se um amplificador bipolar de uso geral na etapa de controle de potência. O sensor de temperatura empregado foi o MPC9700, da Microchip, sendo montado dentro do compartimento do FBG, em contato com as partes metálicas. A etapa de potência que controla o arranjo de Peltiers, foi implementada com os transistores TIP120 e TIP125 atuando como controladores lineares em configuração "push-pull". Como não há necessidade de respostas rápidas, neste caso deu-se preferência para um atuador linear de baixa potência dispensando-se o uso de chaveadores.

A figura 7 mostra o diagrama eletrônico completo do controlador de temperatura desenvolvido.

Figura 7: Diagrama eletrônico do controlador de temperatura

O aspecto físico do conjunto completo, incluindo o compartimento do FBG e o circuito controlador de temperatura, é mostrado na figura 8.

Figura 8: Aspecto do conjunto do FBG com o controlador de temperatura incluído

Nas fotos das figuras 9 e 10, a seguir, são mostradas algumas das etapas da confecção das partes mecânicas e da montagem do compartimento do FBG.

Figura 9: Confeção da base e sulco para alojamento do FBG.

Figura 10: Corte da tampa circular superior e montagem da câmara térmica

A fixação da base do FBG, que fica em contato direto com os elementos de aquecimento, foi fixada com parafusos longos de aço inoxidável, para não acrescentar demasiadas perdas de calor.

O FBG foi instalado posteriormente, no sulco circular praticado, e a parte superior da câmara foi isolada com isopor, conforme mostrado na foto da figura 8.

4 Giga de testes para simulações de intrusão

Para introdução de estímulos controlados num pequeno trecho da fibra, foi construída uma giga de teste especial, conforme ilustrado na foto da figura 11. A giga foi construída com dois conjuntos de polias montadas sobre rolamentos, espaçados entre si de maneira a acomodar aproximadamente 10 m de fibra. Uma das extremidades da fibra foi fixada à estrutura, sendo a tração de teste aplicada na extremidade oposta. O atrito reduzido das polias favorece a distribuição uniforme da

tensão mecânica aplicada. Uma escala graduada foi prevista para permitir a calibração das deformações (elongações) induzidas. As trações são aplicadas manualmente controlando-se a distensão induzida por meio da escala graduada.

Pela maior facilidade de construção e recursos ferramentais disponíveis, tanto a estrutura da giga como as polias foram confeccionadas em madeira. A foto da figura 10 mostra o aspecto do conjunto já montado e com a fibra instalada.

Figura 11: Giga de teste construída para as simulações de intrusão

Nas fotos das figuras 13 a 16, a seguir são mostradas algumas das etapas da confecção das peças de madeira.

Figura 13: Corte do "blank" das polias e furação do rebaixo para alojamento dos rolamentos

Figura 14: Regularização da geometria das polias em serra circular com uso de gabarito

Figura 15: Fresagem dos canais para alojamento da fibra com tupa manual

Figura 16: Polias fresadas e partes da estrutura já preparadas para a montagem final

As fotos da figura 17 mostram detalhes da giga de testes instalada no experimento e da escala graduada utilizada para calibrar os estímulos aplicados.

Figura 17: Detalhe da giga de testes instalada e da escala graduada

5 Acomodação dos componentes ópticos

Para maior proteção e facilidade de manuseio, alguns dos componentes ópticos foram acomodados em bases de madeira com a adição de conectores fixos, conforme exemplos ilustrados na figura 18.

Figura 18: Exemplos de componentes ópticos acomodados em bases com conectores