

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ELETRÔNICA E SISTEMAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Marianne Stely Peixoto e Silva

**Sensor Distribuído de Temperatura à Fibra Óptica
Baseado em Espalhamento Raman**

Recife
2018

Marianne Stely Peixoto e Silva

Sensor Distribuído de Temperatura à Fibra Óptica Baseado em Espalhamento Raman

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Pernambuco como parte dos requisitos para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.
Área de Concentração: Fotônica.

Orientador: Prof. Dr. Joaquim Ferreira Martins Filho

Recife
2018

Catálogo na fonte
Bibliotecária Maria Luiza de Moura Ferreira, CRB-4 / 1469

S586s Silva, Marianne Stely Peixoto e.
Sensor distribuído de temperatura à fibra óptica baseado em espalhamento Raman /
Marianne Stely Peixoto e Silva. - 2018.
84 folhas, il.; abr., sigl. e simb.

Orientador: Prof. Dr. Joaquim Ferreira Martins Filho.
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de
Pós-graduação em Engenharia Elétrica, 2018.
Inclui Referências.

1. Engenharia Elétrica. 2. Sensor óptico. 3. Fibra óptica. 4. Temperatura.
5. Espalhamento Raman. 6. OTDR. I. Martins Filho, Joaquim Ferreira (Orientador).
II. Título.

UFPE

621.3 CDD (22. ed.)

BCTG/2018-248



Universidade Federal de Pernambuco

Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

PARECER DA COMISSÃO EXAMINADORA DE DEFESA DE
DISSERTAÇÃO DO MESTRADO ACADÊMICO DE

MARIANNE STELY PEIXOTO E SILVA

TÍTULO

**“SENSOR DISTRIBUÍDO DE TEMPERATURA À FIBRA ÓPTICA
BASEADO EM ESPALHAMENTO RAMAN”**

A comissão examinadora composta pelos professores: JOAQUIM FERREIRA MARTINS FILHO, DES/UFPE; RENATO EVANGELISTA DE ARAUJO, DES/UFPE; JEHAN FONSÊCA DO NASCIMENTO, CAA/UFPE e SERGIO CAMPELLO OLIVEIRA, POLI/UPE, sob a presidência do primeiro, consideram a candidata **MARIANNE STELY PEIXOTO E SILVA APROVADA.**

Recife, 05 de março de 2018.

MARCELO CABRAL CAVALCANTI
Coordenador do PPGEE

JOAQUIM FERREIRA MARTINS FILHO
Orientador e Membro Titular Interno

JEHAN FONSÊCA DO NASCIMENTO
Membro Titular Externo

RENATO EVANGELISTA DE ARAUJO
Membro Titular Interno

SERGIO CAMPELLO OLIVEIRA
Membro Titular Externo

À minha mãe, Socorro, e às minhas tias, Silvanida, Clemilda, Maria Cícera e Sileide (in memoriam), mulheres guerreiras que, com muito carinho e generosidade, não mediram esforços para que eu chegasse até aqui.

A elas, dedico todas as minhas obras!

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente ao maior mestre que alguém pode ter, Deus, pela condição de ter chegado até aqui. Pelas oportunidades e conquistas, não somente ao longo desses dois anos de mestrado, mas ao longo de toda a minha vida.

Agradeço ao meu orientador, Prof. Joaquim F. Martins Filho, por ter me aceitado como orientanda e me conceder a honra de participar do seu Grupo de Pesquisa em Sensores e Instrumentação, pela preciosa ajuda e ótima orientação na realização deste trabalho.

Agradeço ao Prof. Jehan Fonsêca do Nascimento, por participar da minha formação e também pelos valorosos conselhos que foram muito importantes para a concretização deste trabalho.

Agradeço aos membros da banca examinadora, Prof. Renato Evangelista de Araújo e ao Prof. Sérgio Campello Oliveira, por terem aceitado o convite para participar da defesa desta Dissertação e por suas contribuições valiosas.

Agradeço aos amigos e parceiros de laboratório, Henrique Patriota e Marcionilo Silva, pelos ensinamentos nas minhas atividades iniciais, pela partilha de suas experiências e pelas conversas descontraídas e enriquecedoras.

Agradeço à minha mãe, irmãos, sobrinhas e a toda minha família, pelo amor, pelos ensinamentos e apoio ao longo dessa jornada e de toda a minha vida. Agradeço ao meu namorado, Thiago Lima, pelo amor e companheirismo, pelo cuidado e incentivo e por estar sempre ao meu lado, principalmente nas horas difíceis e de cansaço.

Agraço aos antigos professores e amigos que tanto me inspiram, Prof. João Francisco de Freitas e Prof. Gustavo Camelo, pelo incentivo e ensinamentos, que foram de fundamental importância para que eu chegasse até esta etapa da minha vida.

Agradeço ao Grupo de Pesquisa em Sensores e Instrumentação do Departamento de Eletrônica e Sistemas (DES) da UFPE e aos colegas do Laboratório de Fotônica. Em especial, Bruno Vinícius, Francisco Ariaildo, Felipe Camargo, Hawson Filho, Hebio Junior, Henrique Patriota, Keila Santos, Marcionilo Silva, Mozart Correia, Valdemir Manoel pela parceria, partilha de experiências e momentos de descontração.

Agradeço aos amigos de longa data, Alanne, Álvaro, Bruna, Célio, Cíntia, Daniel, Edgar, Gabriel, João Paulo, Lucas, Natália, Paulo, Rosângela, Sara, Renato e Thathawanna por estarem sempre ao meu lado, sejam quais forem as circunstâncias, me dando força e ânimo para as minhas conquistas.

Agradeço aos funcionários do DES, em especial, à Sra. Andréia Tenório pelo trabalho genuíno, dedicação e atenção com todos do PPGEE.

Agradeço ao Departamento de Física da UFPE, em especial, aos professores Anderson Gomes e Leonardo Menezes pelo cedência do laser de bombeio no momento em que eventualidades surgiram.

Agradeço ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e à CAPES pelo suporte financeiro.

Por fim, agradeço a todos aqueles que de certa forma contribuíram para a realização desta Dissertação.

A todos, deixo o meu muito obrigada!

“Por vezes sentimos que aquilo que fazemos não é senão uma gota de água no mar. Mas o mar seria menor se lhe faltasse uma gota”.

(Madre Teresa de Calcutá)

RESUMO

A presente dissertação relata o desenvolvimento de um sensor distribuído à fibra óptica para o monitoramento de temperatura baseado em espalhamento Raman espontâneo. O sensor foi implementado a partir de um esquema simples e econômico, utilizando OTDR (reflectômetro óptico no domínio do tempo) comercial e amplificador à fibra dopada com Érbio (EDFA) padrão. Para obtenção da distribuição espacial de temperatura, utiliza-se o sinal retroespalhado Raman anti-Stokes modulado por variações de temperatura do ambiente externo à fibra. Em algumas situações, a razão entre as intensidades dos sinais retroespalhados anti-Stokes e Stokes é utilizada. O sistema proposto foi avaliado em 27 Km de fibra monomodo padrão e testado para pulsos-OTDR com larguras diferentes. O funcionamento do sensor foi demonstrado na faixa de temperatura entre 30 °C e 100 °C. Os resultados experimentais mostram que a sensibilidade do sensor em diferentes regiões de detecção pode depender da largura temporal do pulso emitido na entrada do enlace. Usando o esquema proposto, com pulsos de 100 ns e um EDFA com 18 dBm de potência de saída, foi obtido um alcance de 15 Km, com resolução de temperatura de 5 °C na medida de temperatura, medindo variações de temperatura na posição de 3,4 Km do link. Para pulsos de 4000 ns, o sensor de temperatura possui faixa de operação de pelo menos 27 Km, resolução de temperatura 10 °C, medindo variações de temperatura na posição 25,4 Km.

Palavras-chave: Sensor óptico. Fibra óptica. Temperatura. Espalhamento Raman. OTDR.

ABSTRACT

The hereby dissertation reports the development of a distributed fiber-optic sensor for monitoring temperature based on spontaneous Raman Scattering. The sensor was implemented from a simple and economic scheme by making use of a commercial Optical Time Domain Reflectometer (OTDR) and a standard Erbium-doped fiber amplifier (EDFA). Backscattered anti-Stokes Raman signal modulated by temperature variations of the external environment of the fiber was used in order to assess the spatial distribution of temperature. In some scenarios, the ratio between the intensity of the backscattered Stokes and anti-Stokes signals was used. The hereby proposed system was evaluated in 27 Km of standard single-mode optical fiber and tested for OTDR pulses of varying pulsewidths. The sensor was tested and demonstrated in a temperature range between 30 °C and 100 °C. Experimental results evidence that the sensitivity of the sensor throughout different detection regions can be improved (or worsened) as a consequence of the temporal pulse width emitted in the entrance of the link. By employing the proposed scheme, with pulses of 100 ns and a EDFA with 18 dBm of output power, we obtained a reach of 15 Km, with temperature resolution of 5 °C in the measurement of temperature, with temperature measurements at the 2,4 Km mark in the link. As for pulses of 4000 ns, the sensor features an average operating range of at least 27 Km, 10 K temperature resolution, with measurements at the 25,4 Km mark.

Keywords: Optical sensor. Optical fiber. Temperature. Raman scattering. OTDR.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Diagrama de energia dos processos de emissão de fótons Stoke e anti-Stokes no Espalhamento Raman.	21
Figura 2 – Razão $n_j/n_j + 1$ da seção de choque dos Espalhamentos Raman Stokes e Raman anti-Stokes como uma função de temperatura e do deslocamento de frequência.	23
Figura 3 – Esquemática do espectro de comprimento de onda da luz espalhada em fibras ópticas.	25
Figura 4 – Potência do sinal Raman anti-Stokes em função da temperatura.	26
Figura 5 – Ilustração do princípio geral de detecção dos sensores a fibra óptica (a) extrínsecos e (b) intrínsecos. (UDD; SPILLMAN-JR, 2011).	29
Figura 6 – Classificação dos Sensores a Fibra Óptica em três categorias: região de detecção, princípio de operação e aplicação (LI et al., 2012).	30
Figura 7 – Esquemática de testes em fibras ópticas usando OTDR (BOLOGNINI; HARTOG, 2013).	34
Figura 8 – Resultado típico de medição usando OTDR.	35
Figura 9 – Arranjo típico dos sensores distribuídos de temperatura baseado no Efeito Raman em fibras ópticas.	39
Figura 10 – Arranjo experimental do primeiro sensor distribuído de temperatura baseado no Espalhamento Raman proposto por Dakin et al. (1985). (DAKIN et al., 1985).	41
Figura 11 – Esquemática do arranjo experimental proposto por Hartog et al. (1985) para detecção distribuída de temperatura baseado em espalhamento Raman usando a técnica OTDR (HARTOG; LEACH; GOLD, 1985).	42
Figura 12 – Esquemática do arranjo experimental proposto por Bolognini et al. (2007) para detecção distribuída de temperatura baseado em espalhamento Raman usando pulsos codificados e amplificação Raman discreta. (BOLOGNINI et al., 2007).	44
Figura 13 – Resultados obtidos por Bolognini e colaboradores (2007): traços da intensidade da luz anti-Stokes recebida obtidos usando (a) OTDR convencional, (b) OTDR codificado (codificação <i>Simplex</i> de 255 bits) e (c) OTDR codificado e amplificação Raman discreta (BOLOGNINI et al., 2007).	44
Figura 14 – Esquemática do arranjo experimental proposto por Bassan et al. (2016) para detecção distribuída de temperatura baseado em espalhamento Raman usando OTDR comercial e EDFA com ganho controlado (BASSAN et al., 2016).	45

Figura 15 – Curvas OTDR para o segundo ponto de aquecimento (carretel 4): (a) OTDR I com faixa dinâmica de operação de 50 dB, resolução espacial/perdas de 0,8 m /0,001 dB; (b) OTDR II com faixa dinâmica de operação de 36 dB, resolução espacial/perdas de 0,1 m /0,001 dB; (c) OTDR III com faixa dinâmica de operação de 35 dB, resolução espacial/perdas de 0,01 m /0,08 dB; (BASSAN et al., 2016).	46
Figura 16 – Arranjo experimental utilizado para implementar o SDT-R usando OTDR comercial e EDFA padrão	48
Figura 17 – (a) Curva OTDR dos sinais retroespalhados Raman Stokes e anti-Stokes; (b) curvatura acentuada adicionada propositalmente ao final da fibra para evitar reflexão do sinal no final da fibra	49
Figura 18 – (a) Configuração do amplificador óptico tipo EDFA padrão utilizado no SDT-R proposto,(b) diagrama da montagem utilizada para analisar o ganho do EDFA.	52
Figura 19 – Ganho EDFA em função da potência de bombeio.	53
Figura 20 – Fotografia de alguns componentes utilizado para obtenção das curvas de temperatura	54
Figura 21 – Fotografia do carretel de alumínio utilizado para inserir 627 m de fibra no forno para aquecimento	55
Figura 22 – (a) filtro óptico customizado da <i>OptoLink</i> com duas portas de saída referentes as bandas anti-Stokes (<i>OUT 1450 nm</i>) e Stokes (<i>OUT 1660 nm</i>); (b) espectro de saída do filtro.	57
Figura 23 – Diagrama de bloco do filtro óptico utilizado na implementação do SDR-R proposto. A caixa do filtro é composto por uma filtro passa banda de banda larga com uma porta de entrada e duas portas de saídas, porta Stokes (1650) e porta anti-Stokes(1450 nm). Em adição a porta anti-Stokes foi inserido um filtro WDM (1450/1550)	58
Figura 24 – Curvas da intensidade em função da distância de propagação e picos de intensidades dos sinais retroespalhados Raman anti-Stokes (a e b) e Stokes (c e d) para diferentes temperatura obtidas via OTDR	60
Figura 25 – Picos de intensidade do sinal restroespalhado Raman anti-Stokes referentes ao aumento de temperatura (a) sem processamento de dados, (b) aplicando o método de correção referenciado, (c) utilizando o método de normalização	62
Figura 26 – Amplitude do sinal anti-Stokes normalizada (a) para toda a extensão do link sensor e (b) na região de aquecimento medida usando 627 m de fibra aquecida na posição 3,4 km para o pulsos - OTDR de 100 ns.	64
Figura 27 – Curva de calibração de temperatura a partir da intensidade das curvas anti-Stokes normalizadas pelo método que utiliza curva anti-Stokes a uma temperatura de referência e aplicação do método de correção referenciada.	64

Figura 28 – Distribuição de temperatura em função do comprimento da fibra (a) e picos de temperatura (b) medidos usando 627 m de fibra aquecida na posição 3,4 km para o pulsos - OTDR de 100 ns.	65
Figura 29 – Curva de calibração de temperatura a partir da razão entre as intensidade anti-Stokes e Stokes normalizadas pelo método que utiliza curva anti-Stokes e Stokes a uma temperatura de referência e aplicação do método de correção referenciada, obtida para medições usando pulsos-OTDR de 100 ns e variações de temperatura na posição de 3,4 Km do enlace.	66
Figura 30 – Distribuição temperatura em função do comprimento da fibra (a) e picos de temperatura (b) obtidos a partir da calibração que relaciona a razão entre as intensidades anti-Stokes e Stokes medidas usando 627 m de fibra aquecida na posição 3,4 km para o pulsos - OTDR de 100 ns	67
Figura 31 – Amplitude do sinal anti-Stokes normalizada (a) para toda a extensão do link sensor e (b) na região de aquecimento medida usando 627 m de fibra aquecida na posição 3,4 km para o pulsos - OTDR de 4000 ns.	67
Figura 32 – Curva de calibração de temperatura a partir da intensidade anti-Stokes normalizada obtida para medições usando pulsos-OTDR com 4000 ns variações de temperatura na posição de 3,4 Km do enlace.	68
Figura 33 – Distribuição de temperatura em função da distância (a) e picos de temperatura (b) medida usando 627 m de fibra aquecida na posição de 3,4 Km para pulsos - OTDR de 4000 ns.	68
Figura 34 – Intensidade dos sinais anti-Stokes retroespalhados medidos usando 627 m de fibra aquecida na posição 25,4 km, usando pulsos-OTDR de (a) 100 ns, (b) 1000 ns, (c) 2000 ns e (d) 4000 ns.	69
Figura 35 – Curva de calibração de temperatura a partir da intensidade anti-Stokes normalizadas obtida usando pulsos - OTDR de 4000 ns e variações de temperatura na posição de 25,4 Km do enlace.	70
Figura 36 – Distribuição de temperatura em função da distância (a) e picos de temperatura (b) obtida usando 627 m de fibra aquecida na posição de 25,4 Km para pulsos - OTDR de 4000 ns.	70
Figura 37 – Picos de intensidade do sinal restroespalhado Raman anti-Stokes referentes ao aumento de temperatura em 2 m na posição 3,4 Km usando pulsos-OTDR de 100 ns	71
Figura 38 – Curva de calibração de temperatura a partir da intensidade anti-Stokes normalizadas usando pulsos-OTDR de 100 ns e variações de temperatura em 2m na posição de 3,4 Km do enlace.	72
Figura 39 – Distribuição temperatura em função do comprimento da fibra (a) e picos de temperatura (b) medidos usando 2 m de fibra aquecida na posição 3,4 km para pulsos - OTDR de 100 ns.	72

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

WDM	<i>Wavelength-Division Multiplexing</i> - Multiplexação por Divisão de Comprimento de Onda
SBS	<i>Stimulated Brillouin Scattering</i> - Espalhamento Brillouin Estimulado
SRS	<i>Stimulated Raman Scattering</i> - Espalhamento Raman Espontâneo
laser	<i>Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation</i> - Amplificação da Luz por Emissão Estimulada de Radiação
OTDR	<i>Optical Time-Domain Reflectometry</i> - Reflectometria Óptica no Domínio do Tempo
POTDR	<i>Polarization Optical Time Domain Reflectometry</i> - Reflectometria Óptica no Domínio do Tempo de Polarização
OFDR	<i>Optical Frequency Domain Reflectometry</i> - Reflectometria Óptica no Domínio da Frequência
OLCR	<i>Optical Low Coherence Reflectometry</i> - Reflectometria Óptica de Baixa Coerência
CW	<i>Continuous Wave</i> - onda contínua
ADC	<i>Analog-to-Digital Converter</i> - conversor analógico-digital
DSP	<i>Digital Signal Processor</i> - Processador Digital de Sinais
SNR	<i>Signal-to-Noise Ratio</i> - Razão Sinal-Ruído
SDT-R	Sensor Distribuído de Temperatura baseado em Espalhamento Raman
EDFA	<i>Erbium Doped Fiber Amplifier</i> - Amplificador de Fibra Dopada a Érbio
LRA	<i>Lumped Raman Amplification</i> - Amplificador Raman Discreto
OTDR	<i>Óptical Time-Domain Reflectometer</i> - Reflectômetro Óptico no Domínio do Tempo
S	Stokes
AS	<i>anti-Stokes</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

E_0 – Estado fundamental de energia

E_n – n-ésimo estado energético

h – Constante de Planck

ν – Frequência da onda

ν_{AS} – Frequência da onda anti-Stokes

ν_S – Frequência da onda Stokes

\mathcal{H} – Hamiltoniano do sistema

n_j – Estado energético do modo normal de vibração do j-ésimo oscilador

$\Delta\nu$ – Deslocamento de frequências

K_B – Constante de Boltzman

T – Temperatura

τ – Período de pulso

S – Fator de captura

v_g – Velocidade de grupo

P_S – Potência do sinal retroespalhado

P_0 – Potência incidente na entrada da fibra

α_S – Coeficiente de espalhamento Rayleigh

α – Coeficiente de atenuação

c – Velocidade da luz no vácuo

I_S – Intensidade do sinal retroespalhado Raman Stokes

I_{AS} – Intensidade do sinal retroespalhado Raman anti-Stokes

K_S – Constante

K_{AS} – Constante

λ_S – Comprimento de onda da onda Stokes

λ_{AS} – Comprimento de onda da onda anti-Stokes

α_S – Coeficiente de perdas da onda Stokes

α_{AS} – Coeficiente de perdas da onda anti-Stokes

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	Motivação	17
1.2	Organização do trabalho	17
2	FUNDAMENTOS DO ESPALHAMENTO RAMAN	19
2.1	Introdução aos Efeitos Não Lineares	19
2.2	Aspectos Teóricos do Espalhamento	20
2.3	Mecanismo de Sensoriamento de Temperatura baseado em Espalhamento de luz em fibras ópticas	24
3	SENSORES DE TEMPERATURA À FIBRA ÓPTICA	27
3.1	Sensores Ópticos	27
3.2	Sensores a Fibra Óptica	28
3.2.1	<i>Sensores a fibra óptica distribuídos</i>	30
3.3	Técnicas de Reflectometria óptica	32
3.3.1	<i>Reflectometria óptica no domínio do tempo</i>	33
3.4	Aspectos básicos dos sistemas de detecção distribuída de temperatura baseado em espalhamento Raman	36
3.5	Sensores Distribuídos de Temperatura baseados em Espalhamento: revisão da literatura	40
4	DESENVOLVIMENTO DO SENSOR DE TEMPERATURA DISTRIBUÍDO BASEADO EM ESPALHAMENTO RAMAN	47
4.1	Configuração Experimental do Sensor de Temperatura proposto	47
4.2	Componentes utilizados na concepção de sensor distribuído	49
4.2.1	Especificações do OTDR utilizado	50
4.2.2	Caracterização do amplificador EDFA	52
4.2.3	Descrição do enlace óptico fibra sensora	54
4.2.4	Filtro óptico	56
4.3	Medições de temperatura	57
5	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	74
5.1	Conclusões e Perspectivas Futuras	75
	REFERÊNCIAS	77

1 INTRODUÇÃO

Os sensores à base de fibra óptica têm sido objeto de estudo desde a década de 1970, e desde então uma infinidade de sensores ópticos foram propostos para monitorar vários tipos de grandezas tais como: rotação, vibrações, corrente elétrica, campo magnético, temperatura, pressão e outros (BOLOGNINI; HARTOG, 2013; UDD; SPILLMAN, 2011). A grande gama de aplicações potenciais para esses sensores tem gerado um interesse contínuo nas pesquisas e desenvolvimento de sistemas de detecção distribuídos (ROSSETTO et al., 2004).

Os sensores distribuídos de temperatura baseados no espalhamento Raman em fibras ópticas têm sido propostos para aplicações em diversas áreas, tais como monitoramento de temperatura em linhas elétricas para alta potência, prevenção e detecção de incêndio em poços de petróleo, aplicações aeronáuticas e espaciais. A passividade da fibra também permite o uso de sensores distribuídos de temperatura baseados em Raman em ambientes hostis como atmosferas explosivas, plantas nucleares e ambientes com alta interferência eletromagnética. Além disso, esses sensores podem ser usados para monitorar temperaturas em locais de difícil acesso por longas distâncias (dezenas de quilômetros) (BOLOGNINI; HARTOG, 2013). Essa gama de aplicações serviu de motivação inicial para o desenvolvimento do sensor aqui apresentado.

Em geral, a detecção de temperatura a partir do Espalhamento Raman é baseado na técnica de reflectometria óptica no domínio tempo e a distribuição de temperatura pode ser obtida medindo as intensidades dos sinais retroespalhados Stokes e anti-Stokes gerados no espalhamento Raman. A principal limitação dos sensores de temperatura baseados em Raman é baixa potência do sinal anti-Stokes retroespalhado. Por esse motivo módulos de amplificação são inseridos no design desses sensores para obter um desempenho aprimorado (HAUS, 2010; BASSAN et al., 2015).

Este trabalho contribui no sentido de que apresenta o desenvolvimento de um sensor de temperatura baseado em espalhamento Raman implementado usando um reflectômetro óptico no domínio do tempo (OTDR) comercialmente disponível para enviar pulsos de curta duração e identificar sinais de baixa potência em uma faixa de banda larga. E combina os recursos do OTDR com um amplificador de fibra dopada com érbio (EDFA) para gerar pulsos de alta intensidade enviados ao longo de uma fibra sensora e para detectar as componente do espalhamento Raman. O sensor apresentado possui uma configuração simplificada quando comparado a outros sensores que utilizam a técnica OTDR. Esse trabalho apresenta uma análise inovadora da sensibilidade do sensor proposto e do regime de operação do sensor .

O OTDR comercial é um instrumento amplamente utilizado para caracterizar fibras ópticas com alto potencial de testes e medições. Parte de um princípio bem estabelecido, mas são melhorados constantemente para atender as novas demandas e oferecer mais versatilidade (BASSAN et al., 2016). Atualmente, OTDRs portáteis, capazes de efetuar medições rápidas e altamente precisa, estão comercialmente disponíveis e com custos cada vez menores. Um OTDR

operando em 1310/1550/1650 nm, com faixa dinâmica de operação de 45 dB e resolução de 1 m pode ser adquirido por cerca de 22 mil reais (alguns milhares de dólares). Desde de sua criação, os OTDRs são equipamentos cada vez mais indispensáveis e acessíveis, e sua utilização para aplicações diversas tem sido expandida e continuará a crescer (CHAMPAVERE, 2014).

1.1 Motivação

Nos sensores distribuídos à fibra óptica, o perfil de uma grandeza pode ser medido ao longo da fibra. Essas características dos sensores distribuídos intrínsecos tornam-os particularmente atraentes para uma gama de aplicações que requerem o monitoramento de uma determinada grandeza continuamente ou em um grande número de pontos (UDD; SPILLMAN, 2011). O grande número de aplicações potenciais para os sensores distribuídos de temperatura constitui a motivação básica para o desenvolvimento do sensor relatado neste trabalho.

Atualmente já existem sistemas comerciais para a monitoração distribuída de temperatura utilizando fibras ópticas. Uma das principais aplicações é a prevenção e detecção de incêndio, onde os sensores de temperatura podem ser utilizados para longas distância e regiões que podem oferecer risco de vida (BOLOGNINI; HARTOG, 2013) Também é possível destacar a monitoração de linhas elétricas de alta potência. Nesses sistemas a transmissão de potências elétricas elevadas aquecem os cabos de transmissão e comprometem o estrutura do sistema. Assim, o monitoramento de temperatura atua de forma preventiva, e contribui para a conservação da estrutura e para a otimização do sistemas (BAO; CHEN, 2012). Esses sistemas também apresentam soluções para diversas aplicações na indústria do petróleo. A detecção distribuída de temperatura tem sido a principal técnica utilizada para monitoramento de poços e reservatórios para produção de petróleo e gás (OMAR, 2013).

1.2 Organização do trabalho

Além deste capítulo introdutório, esta dissertação foi organizada em mais 4 capítulos. Esses capítulos abordam os seguintes assuntos: 2) aspectos básicos do espalhamento Raman espontâneo, 3) revisão da literatura sobre sensores ópticos à base de fibra óptica, 4) desenvolvimento do sensor de temperatura distribuído, e por fim, 5) as conclusões e perspectivas para trabalhos futuros.

O Capítulo 2 apresenta uma revisão teórica do espalhamento Raman espontâneo, onde os conceitos e as características básicas desse fenômeno são apresentadas. Também são introduzidos os mecanismos de detecção de temperatura baseados em espalhamento de luz.

O Capítulo 3 apresenta uma revisão da literatura sobre sensores ópticos de fibra óptica. Também são abordadas técnicas de reflectometria óptica, destacando a reflectometria óptica no domínio tempo. Além disso, uma revisão da literatura e o princípio de funcionamento dos sensores de temperatura são apresentados.

O Capítulo 4 relata as etapas de desenvolvimento do sensor. Nesse capítulo é apresentada a configuração experimental usada para detectar variações de temperatura. Também são destacadas especificações dos componentes utilizados na implementação do sensor. Por fim são apresentados e discutidos os resultados obtidos experimentalmente.

O Capítulo 5 apresenta a importância dos resultados mostrados nos Capítulos 4, como também apresenta as perspectivas de trabalhos futuros que podem vir a contribuir com o aperfeiçoamento do sistema proposto.

2 FUNDAMENTOS DO ESPALHAMENTO RAMAN

Neste capítulo, faz-se uma revisão teórica do Espalhamento Raman. Na Seção 2.1 é feita uma introdução aos efeitos não lineares em fibra óptica. Na seção 2.2 são apresentados os aspectos gerais do Espalhamento Raman espontâneo, onde conceitos e características principais desse fenômeno são discutidas. Por fim, na seção 2.4, são introduzidos os mecanismos de sensoriamento de temperatura, com o objetivo de informar acerca de como a informação de temperatura pode ser extraída por meio do espalhamento de luz em fibras ópticas.

2.1 Introdução aos Efeitos Não Lineares

Na óptica, a linearidade ou não-linearidade de um fenômeno é referente à sua dependência ou independência da intensidade, respectivamente (SINGH; SINGH, 2007). Com o surgimento de novas tecnologias na década de 1995, como amplificação óptica, multiplexação por divisão de comprimento de onda (WDM - wavelength-division multiplexing) e outros, os sistemas de comunicações por fibra óptica passaram a operar com taxas de bits mais altas, da ordem de Giga bits por segundo, e comprimentos de ligações de fibras além de milhares de quilômetros. Nesse novo cenário, em que múltiplos canais de alta intensidade passaram a ser propagados numa mesma fibra óptica por longas distâncias, o surgimento das não linearidades podem implicar em grandes limitações ao desempenho dos modernos sistemas WDM. Como resultado, os efeitos não lineares em fibra óptica, até então considerados irrelevantes, passaram a ter grande importância no design de projetos de comunicações ópticas (AGRAWAL, 2001; RAMASWAMI; SIVARAJAN; SASAKI, 2009).

Em uma fibra óptica, muitos efeitos não lineares começam a aparecer com o aumento da potência óptica. Esses efeitos surgem quando diversos campos elétricos intensos, presentes numa mesma fibra, interagem com o material (KEISER, 2014). Os efeitos não lineares podem ser organizados em duas categorias: a primeira categoria agrupa os efeitos que ocorrem devidos ao espalhamento inelástico não linear. Nesse caso, as ondas luminosas interagem com os fônons (vibrações moleculares) da sílica. Como exemplo desse efeito têm-se o Espalhamento Brillouin Estimulado (SBS - *Stimulated Brillouin Scattering*) e Espalhamento Raman Espontâneo (SRS - *Stimulated Raman Scattering*), onde os tipos de fônons envolvidos em cada caso são diferentes (ópticos e acústicos), e o espalhamento de luz em ambos cresce exponencialmente a partir de um limiar da potência incidente (AGRAWAL, 2012; SHEN, 1984); na segunda categoria, os efeitos não lineares ocorrem devidos a dependência do índice de refração do meio com a intensidade do campo elétrico aplicado, onde é observado o Efeito Kerr (AGRAWAL, 2001; RAMASWAMI; SIVARAJAN; SASAKI, 2009). Os processos não lineares desse grupo são Automodulação de Fase (SPM), Modulação Cruzada de Fase (XPM) e Mistura de Quatro Ondas (FWM) (AGRAWAL, 2001; RAMASWAMI; SIVARAJAN; SASAKI, 2009; WU; WAY, 2004; TOULOUSE, 2005).

Os efeitos não lineares podem degradar e impor limitações aos sistemas ópticos, como apontam diversos trabalhos (FUKASE, 2010; FORGHIERI; TKACH; CHRAPLYVY, 1997; ZOU et al., 1996; ZOU et al., 2015; ESSIAMBRE et al., 2010; ESSIAMBRE; TKACH, 2012). Todavia, as não linearidades na fibra óptica possuem aplicações bastante úteis, tais como sensoriamento (BAZZO et al., 2016; PRADHAN; SAHU, 2015; PARK et al., 2006; PRADHAN; SAHU, 2015). O estudo dessas aplicações tem instituído uma área de pesquisa significativamente promissora por diversas razões, dentre as quais pode-se destacar o número de diferentes parâmetros possíveis para medição e a gama de aplicações industriais e científicas e, por consequência, o potencial comercial desses sensores (UDD; SPILLMAN, 2011; SILVA; PONTES; SEGATTO, 2016; BOLOGNINI; HARTOG, 2013).

2.2 Aspectos Teóricos do Espalhamento

O físico indiano C. V. Raman, juntamente com K.S. Krishnan, publicou, em 1928, o artigo *A New Type of Secondary Radiation* (Um Novo Tipo de Radiação Secundária), que o levou a ganhar o Nobel de Física em 1930. Nesse artigo, os autores mostram, a partir dos resultados de suas experiências, que no espalhamento de luz pelas moléculas de um meio material, a radiação espalhada com o mesmo comprimento de onda que o feixe incidente é acompanhada de uma radiação difusa com frequência modificada (RAMAN; KRISHNAN, 1928). O experimento realizado pelos autores foi consideravelmente simples: consistia em luz solar colimada incidindo em meio aquoso (ou gasoso) purificado, isto é, livre de partículas de poeira. Para detectar a presença da radiação espalhada modificada, os autores utilizaram dois filtros no arranjo experimental: um filtro azul, posicionado antes da amostra do material, e um filtro amarelo, ora posto entre o filtro azul e a amostra, e ora disposto após a amostra. Desse modo, foram observados dois tipos de espalhamento: (i) o espalhamento elástico, cuja frequência da radiação espalhada é a mesma da radiação incidente - Espalhamento Rayleigh; (ii) e o espalhamento inelástico, no qual a radiação espalhada é deslocada em frequência em relação à radiação incidente. A esse último, foi dado o nome de Efeito Raman.

Quando uma luz interage com as moléculas de um material, ocorre troca de energia entre os fótons da luz incidente e as moléculas (ou átomos) desse material (HEADLEY; AGRAWAL, 2005a). Como produto dessas interações, são originadas duas bandas igualmente espaçadas em frequência em relação a banda principal (Rayleigh). No caso da sílica, essa diferença de frequências é de 13 THz. A banda de menor frequência é denominada Stokes, e a de maior frequência anti-Stokes. Esses processos podem ser compreendidos de uma perspectiva da mecânica quântica fazendo uso dos diagramas de energia mostrado na Figura 1.

A Figura 1 ilustra os processos simplificados de absorção e emissão de energia dos estados no Espalhamento Raman Stokes e Raman anti-Stokes. No espalhamento Stokes (Figura 1-a), o sistema é levado do estado fundamental de energia (E_0) para um estado de maior energia (E_n) devido a absorção de um fóton de energia $h\nu_0$ de uma fonte de luz intensa, tal como um laser. Na relaxação do elétron, um fóton de frequência reduzida $h\nu_S$ é emitido. Esse fóton é

denominado de fóton Stokes. A energia remanescente é emitida pelas moléculas do material, que decaem, não radiativamente, de um estado vibratório excitado E_1 para o estado E_0 (AGRAWAL, 2012). Na Figura (1-a), essa transição entre níveis vibracionais corresponde à emissão de um fônon de energia $h\nu_1$. A energia do fóton Stokes é então,

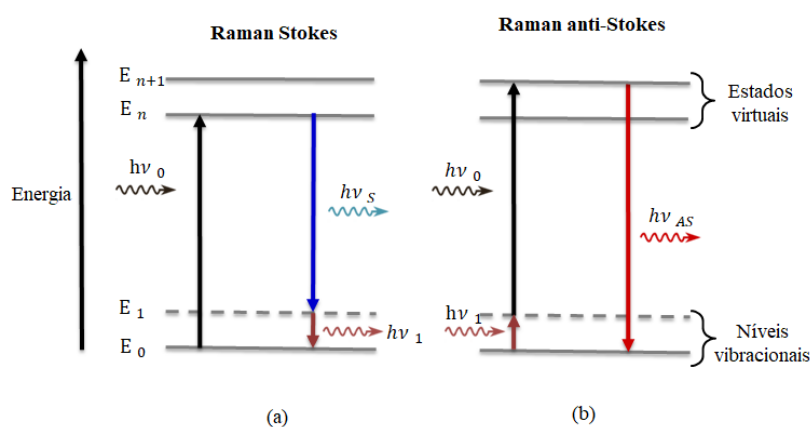
$$h\nu_S = h\nu_0 - h\nu_1, \quad (1)$$

em que h é a constante de Planck e ν é a frequência da onda (SINGH; GANGWAR; SINGH, 2007). No espalhamento anti-stokes, o sistema absorve um fóton da fonte ($h\nu_0$) e um fônon da rede ($h\nu_1$), emitindo um fóton anti-Stokes de maior frequência e de energia $h\nu_{AS}$ (JUNIOR, 2016). O processo anti-Stokes ocorre quando as moléculas do material se encontram em um nível excitado de energia vibracional, representado na (1-b) pela absorção de um fônon da rede. Desse modo, a energia do fóton anti-Stokes emitido deve ser (SINGH; GANGWAR; SINGH, 2007):

$$h\nu_{AS} = h\nu_0 + h\nu_1. \quad (2)$$

As Equações (1) e (2) são obtidas pelo princípio de conservação de energia.

Figura 1 – Diagrama de energia dos processos de emissão de fótons Stoke e anti-Stokes no Espalhamento Raman.



Fonte: adaptado de Aguiar Junior (2016).

A intensidade da onda Stokes é algumas ordens de grandeza maior que a intensidade da onda anti-Stokes. Nesse ponto, fica claro que o fenômeno Raman Stokes é mais provável de ocorrer que o Raman anti-Stokes. Isso é devido ao fato de que a probabilidade de encontrar moléculas em estados excitados é menor do que a de encontrá-las no estado fundamental de energia. Além disso, cerca de 10^{-6} da radiação incidente é espalhada após penetrar 1 cm num meio espalhador o que resulta em intensidades tipicamente baixas do sinal raman anti-Stokes (SAUTER, 1996).

Muitos materiais conhecidos são compostos diatômicos. Um exemplo desses é a sílica (SiO_2), material do qual as fibras ópticas são comumente constituídas. Numa rede cristalina

com átomos distintos, os modos vibracionais dessa rede podem ser de dois tipos, e estão relacionados ao movimento relativo entre átomos do material (modos acústicos e ópticos). Nos modos acústicos, átomos subsequentes de uma rede cristalina estão em movimento de forma coordenada, com mesma amplitude, direção e fase. Os modos ópticos correspondem ao movimento de átomos adjacentes fora de fase, em que os átomos vibram em direções opostas. Assim, a amplitude relativa do movimento desses átomos é maior no modo óptico (KITTEL, 2000). Modos ópticos são assim denominados porque as frequências de vibração típicas são da região do infravermelho ($0,1 - 10 \text{ THz}$). Além disso, as vibrações dos átomos da rede, em sentidos contrários, podem ser estimuladas por um campo eletromagnético nessa faixa espectral (REZENDE, 2004; LÜTH; IBACH, 2003).

Esses modos normais de vibração da rede podem ser associados a um oscilador harmônico quantizado, uma vez que as frequências associadas às oscilações da rede são da ordem de GHz a THz, e justificam a abordagem de uma perspectiva quântica (RIBEIRO, 2011). Assim, a absorção ou emissão de energia devido às oscilações da rede é quantizável, e a energia de transição de um estado fundamental para um estado excitado é $h\nu$, tal como proposto por Planck e postulado por Einstein (PLANCK, 1901; EINSTEIN, 1965). Em que h é a constante de Planck, ν é a frequência do oscilador.

Admitindo que um sólido de N átomos pode ser representado como um sistema com $3N$ osciladores harmônicos de frequência ν , o hamiltoniano \mathcal{H} do sistema para cada modo de vibração são dados por

$$\mathcal{H} = 3 \sum_{j=1}^N (n_j + \frac{1}{2}) h\nu, \quad (3)$$

em que n_j denota o estado energético do modo normal de vibração do j -ésimo oscilador (SALINAS, 1997). O fator 3 foi introduzido porque cada oscilador pode se mover em qualquer uma das 3 direções do espaço. Os estados de energia possíveis para cada oscilador harmônico é dado por

$$E_{n_j} = (n_j + \frac{1}{2}) h\nu, n_j = 1, 2, 3, \dots \quad (4)$$

A equação (4) representa os autoestados de energia dos N osciladores harmônicos.

Os fônons são definidos como *quanta* de vibrações dos materiais (JUNIOR, 2016), ou seja, porções de energia, de origem térmica, das vibrações dos átomos de uma molécula que compõe a rede cristalina de um material. Esse fenômeno é responsável pelas interações observadas no espalhamento de luz. Nesse sentido, os fônons envolvidos no espalhamento Raman são vibrações moleculares e recebem o nome de fônons ópticos, e as vibrações de rede são denominadas de fônons acústicos, no qual estão relacionadas ao espalhamento Brillouin (AGRAWAL, 2000).

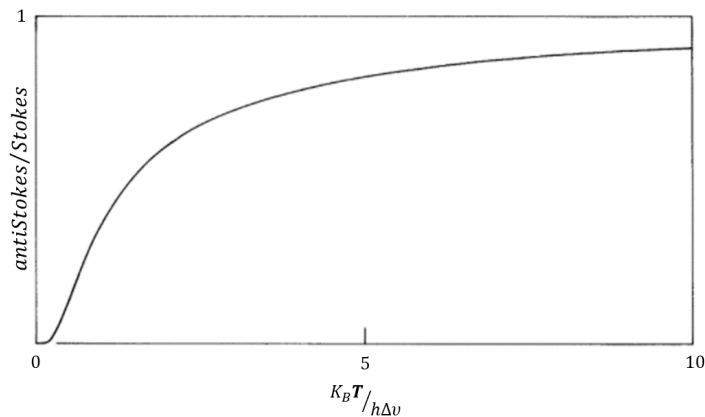
Fônons são partículas que obedecem a estatística de Bose-Einstein (SALINAS, 1997). Desse modo, o número médio de fônons em um certo modo normal de vibração em função da temperatura é dado por

$$\langle n_j(T) \rangle \propto \frac{1}{e^{\frac{h\Delta\nu}{K_B T}} - 1}, \quad (5)$$

em que, $\Delta\nu$ é a diferença em frequência do estado j em relação ao estado fundamental, K_B é a constante de Boltzman e T é a temperatura absoluta do meio. Dessa maneira, o número de fônons n_j em cada nível energético j pode ser determinado.

A seção de choque no processo de espalhamento anti-Stokes é proporcional à distribuição de Bose-Einstein n_j , dada pela equação (5), enquanto que no processo de espalhamento Stokes, a seção de choque é dada por $n_j + 1$. A razão entre $n_j/n_j + 1$ é uma função da temperatura e do deslocamento de frequência em relação ao espalhamento elástico (HAYES; LOUDON, 2012). A Figura 2 ilustra a curva que expressa esse comportamento. Por meio de uma análise simples da Figura 2, é possível perceber que a razão $n_j/n_j + 1$ aumenta com o incremento da temperatura, tendendo a unidade no limite que $T \rightarrow \infty$, assumindo que o termo $h\Delta\nu/K_B$ é invariante. Isso significa que a seção de choque no espalhamento Anti-Stokes aumenta mais rapidamente com a temperatura que a seção de choque no espalhamento Stokes, e, portanto, a probabilidade de que um fóton anti-Stokes seja emitido também aumenta com a temperatura. Por outro lado, no regime de baixas temperaturas, a força de espalhamento anti-Stokes decai, tendendo a zero quando $T \rightarrow 0$. O espalhamento anti-Stokes não ocorre no zero absoluto (SINGH; GANGWAR; SINGH, 2007).

Figura 2 – Razão $n_j/n_j + 1$ da seção de choque dos Espalhamentos Raman Stokes e Raman anti-Stokes como uma função de temperatura e do deslocamento de frequência.



Fonte: (HAYES; LOUDON, 2012)

Até o momento, o espalhamento Raman tem sido apresentado na forma espontânea, quanto ao estímulo do espalhamento. Entretanto, a emissão de fótons, a partir desse processo, pode ocorrer também no modo estimulado (BOYD, 2007). No espalhamento Raman espontâneo, a intensidade da onda Stokes aumenta proporcionalmente com o comprimento da região de interação, enquanto que no Espalhamento Raman Estimulado, essa intensidade cresce exponencialmente com a distância de propagação. Conforme indicado pela denominação, no

espalhamento Raman Estimulado, uma fonte intensa de luz estimula o processo de espalhamento, no qual cerca de 10% da potência da radiação incidente é convertida em fótons Stokes. Como resultado disso, altas intensidades do sinal Stokes podem ser observadas (BOYD, 2007).

Os efeitos do espalhamento Raman estimulado numa fibra óptica podem ser observados em fibras monomodos de longos comprimentos (HEADLEY; AGRAWAL, 2005b). Isso ocorre devido a intensos campos elétricos da luz guiada no núcleo da fibra, já que é possível por causa do uso de *lasers* de alta potência. Por fim, as características dos modos de propagação da luz no guia de onda podem ser entendidas a partir da teoria eletromagnética e das soluções das equações de Maxwell, atendidas as condições de contorno da interface núcleo-casca (RIBEIRO, 1999). De acordo com essa abordagem, parte da radiação difusa no Espalhamento Raman dá origem a novos modos guiados ao longo da fibra. Sendo assim, parte dos fótons Stokes e anti-Stokes pode ser propagada simultaneamente a luz incidente, seja no sentido co-propagante ou contra-propagante (RIBEIRO, 1999).

2.3 Mecanismo de Sensoriamento de Temperatura baseado em Espalhamento de luz em fibras ópticas

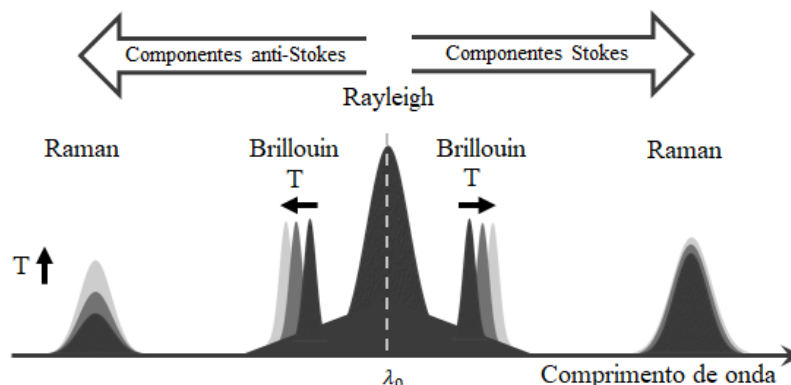
Quando uma luz intensa se propaga em um sistema de transmissão por fibra óptica, diferentes efeitos não lineares podem vir a surgir. Alguns desses efeitos decorrem do espalhamento inelástico da luz e são resultados das interações e trocas de energia entre os fótons incidentes e as vibrações moleculares (fônons) do material, que nesse caso, trata-se da sílica. Essas vibrações possuem características próprias do material, de modo que se as propriedades microscópicas destes forem alteradas por fatores externos, tais como temperatura, tensão e birrefringências locais, essas vibrações também podem ser afetadas. Em decorrência disso, a onda espalhada pode vir a ser modulada de acordo com as alterações externas em pontos específicos (BAO; CHEN, 2012). A possibilidade de realização de medições de fatores externos nessa propriedade foi observada a partir da detecção das componentes resultantes do espalhamento e, portanto, o desenvolvimento de sensores ópticos distribuídos.

Embora os efeitos não lineares, por vezes, instituem severas penalidades ao sistema de comunicação multicanais por fibra óptica, as não linearidades em fibra têm apresentado aplicações significantes, e o estudo desses ramos tem originado um vasto e promissor campo de pesquisa dedicado às tecnologias de sensores ópticos.

No espalhamento de luz em fibras ópticas, os efeitos não lineares decorrentes podem surgir simultaneamente, e a radiação espalhada tem características espectrais diferentes (INAUDI; GLISIC, 2006). A Figura 3 esquematiza o espectro do comprimento de onda da luz espalhada em fibras ópticas quando um sinal de comprimento único de onda é propagado.

O espalhamento Rayleigh (pico central da Figura 3) é resultante do espalhamento elástico de luz e possui o mesmo comprimento de onda e frequência que a radiação da onda de luz incidente. Esse tipo de espalhamento decorre das variações microscópicas localizadas de densidade que levam a flutuações aleatórias do índice de refração (AGRAWAL, 2012).

Figura 3 – Esquematisação do espectro de comprimento de onda da luz espalhada em fibras ópticas.



Fonte: adaptado de INAUDI e GLISIC (2006)

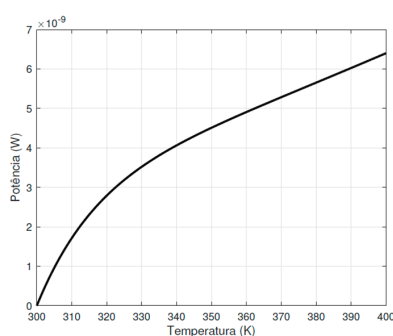
As demais componentes do espectro, mostrado na Figura 3, são decorrentes das interações entre fótons da luz incidente e fônons. Os tipos de fônons envolvidos no espalhamento Raman e no espalhamento Brillouin são diferentes, ópticos e acústicos, respectivamente. A Figura 3 ilustra como a temperatura modula os sinais espalhados: em frequência, no caso do espalhamento Brillouin, e em amplitude, no espalhamento Raman.

As bandas laterais do espalhamento Brillouin, assim como no espalhamento Raman, são denominadas Stokes e anti-Stokes. Sendo originadas em virtude das interações de luz com ondas acústicas, as componentes do espalhamento Brillouin carregam informações sobre temperatura e tensão em pontos externos. A partir dessa característica, é possível desenvolver sensores de temperatura e tensão baseados no espalhamento Brillouin. Nesses sensores, os mecanismos de detecção de temperatura são realizados a partir da medição de frequência e apresentam-se vantajosos em relação às técnicas de medição de intensidade, que costumam ter baixa relação sinal-ruído. Entretanto, essa técnica requer um tempo de interação longo para fazer varredura da diferença de frequências óptica e, portanto, tais sensores tornam-se inadequados para medidas rápidas (BAO; CHEN, 2012). Além disso, o desenvolvimento de sensores de temperatura baseados no espalhamento Brillouin envolvem técnicas muito dispendiosas e aparatos experimentais maiores quando comparados ao sensores baseados em espalhamento Raman. São encontrados na literatura diversos trabalhos que abordam sensores de temperatura baseados em Brillouin (MAUGHAN; KEE; NEWSON, 2001; ALAHBABI; CHO; NEWSON, 2005b; SELKER et al., 2006; PARKER et al., 1997).

No espalhamento Raman, a intensidade da onda anti-Stokes é modulada pelas variações de temperaturas em pontos externos. Quando uma seção (ou pontos específicos) de uma fibra óptica é aquecida, a energia de origem térmica fornecida ao sistema estimula as vibrações moleculares resultando no aumento da geração de fônons e portanto, de fótons anti-Stokes, que carregam assim informações de temperatura nos pontos aquecidos (ver seção 2.2). Em

consequência disso, a intensidade da onda anti-Stokes, que varia conforme a temperatura externa, é alterada em regiões específicas. As técnicas de detecção dos sensores de temperatura a fibra óptica baseado em espalhamento Raman, em geral, consistem na medição da intensidade das componentes retroespalhadas Stokes e anti-Stokes, separadamente. A razão entre essas intensidades fornece o perfil de temperatura ao longo de toda extensão da fibra. As informações de temperatura são extraídas do sinal anti-Stokes, que é fortemente sensível a temperatura, enquanto o sinal Stokes apresenta pouca sensibilidade as variações de temperaturas. Entretanto, a componente Stokes é medida com a finalidade de normalizar o sinal anti-Stokes e minimizar efeitos degradantes ao sinal que podem comprometer o resultado final (SILVA; PONTES; SEGATTO, 2016). A Figura (4) mostra a dependência da componente anti-Stokes com relação à temperatura.

Figura 4 – Potência do sinal Raman anti-Stokes em função da temperatura.



Fonte: (SILVA; PONTES; SEGATTO, 2016)

A medida da localização espacial das alterações de temperatura é realizada via técnicas baseadas em reflectometria óptica no domínio do tempo. Nesse cenário, a medida do intervalo de tempo entre o campo incidente e o retorno da luz espalhada fornece a coordenada espacial de ocorrência do fenômeno (DANIELSON, 1981). Nos sensores de temperatura a fibra óptica são detectados os sinais retroespalhados e evitam-se os sinais refletidos que podem levar a imprecisões na medida de temperatura.

3 SENSORES DE TEMPERATURA À FIBRA ÓPTICA

Neste Capítulo são abordados aspectos gerais sobre sensores ópticos. Além disso, é apresentada uma revisão da literatura sobre sensores de temperatura distribuídos baseados em espalhamento Raman. Na Seção 3.1 os sensores ópticos são definidos. Na Seção 3.2 são apresentadas as principais características dos sensores a fibra óptica. Na Seção 3.2 técnicas de reflectometria óptica são apresentadas, destacando a técnica no domínio do tempo. Na Seção 3.3 é demonstrada a dependência da temperatura e o princípio de medição em sistemas de detecção distribuída de temperatura baseados em espalhamento Raman. Por fim, na Seção 3.4 é apresentada uma breve revisão da literatura em sensores baseados em espalhamento Raman.

3.1 Sensores Ópticos

Sensores ópticos são dispositivos baseados em emissão e detecção de luz que são capazes de detectar e medir diversos parâmetros físicos, químicos e biológicos (UDD; SPILLMAN, 2011). Na literatura é possível encontrar uma vasta gama de aplicações desses sensores com diferentes técnicas e protocolos de desenvolvimento, seja para medições tradicionais ou inovadoras aplicações desses sensores com diferentes técnicas e protocolos de desenvolvimento, seja para medições tradicionais ou inovadoras (UDD; SPILLMAN, 2011). Apesar disso, todos os sensores ópticos possuem a estrutura fundamental comum: fonte de luz, fotodetectores e um componente óptico para guiar a luz (HAUS, 2010).

Embora ainda sofra concorrência de outras tecnologias de sensores consolidadas, tais como sensores eletrônicos, existem sensores ópticos bem sucedidos comercialmente, com tecnologias bem estabelecidas e boa performance (LEE, 2003). Além disso, os sensores ópticos apresentam múltiplas vantagens em relação aos seus análogos eletrônicos. Dentre elas pode-se destacar o baixo ruído, a grande faixa dinâmica, e a preservação da medida no que se refere a erros sistemáticos, uma vez que a medição é feita em um meio isolado do ambiente (HAUS, 2010).

Os mecanismos de detecção dos sensores ópticos são fundamentados na variação de parâmetros do campo da luz, como amplitude, frequência, fase e polarização da onda. Quando esses parâmetros são alterados em virtude de perturbações externas, em pontos específicos do guia de onda, a detecção desta alteração será correlacionada ao fenômeno que se quer monitorar (YIN; RUFFIN, 2002). As alterações podem ocorrer em diversos parâmetros (individualmente ou simultaneamente), e o tipo de sensor é determinado pelas grandezas que se pretende medir, e até mesmo pela finalidade do sistema detector (LEE, 2003).

3.2 Sensores a Fibra Óptica

A tecnologia de fibra óptica revolucionou os sistemas de comunicação (UDD; SPILLMAN, 2011; HECHT, 2004). Embora a utilização de fibras ópticas para guiar luz já fosse conhecida (CULSHAW, 2000), foi em 1966 que o uso da fibra óptica como meio de transmissão de sinal óptico nos sistemas de telecomunicações foi proposto, quando o *laser* (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*) já havia sido demonstrado em 1960 (AGRAWAL, 2012). Na década de 1970, com a diminuição das perdas da fibra e o desenvolvimento de *laseres* de semicondutores (AsGa) capazes de operar continuamente a temperatura ambiente, os sistemas de transmissão por fibra óptica apresentaram avanços consideráveis e mudaram definitivamente os sistemas de comunicação (RAMASWAMI; SIVARAJAN; SASAKI, 2009; UDD; SPILLMAN, 2011). Em 1980, sistemas de transmissão por fibra óptica operando em torno de $0,8 \mu m$ estavam comercialmente disponíveis (AGRAWAL, 2012). Enquanto essa nova tecnologia ascendia, uma área de pesquisa voltada para o desenvolvimento de sensores de fibra óptica e tecnologias relacionadas também emergia (CULSHAW, 2000).

Há mais de 40 anos os estudos sobre sensores ópticos tiveram início, e desde então diversas técnicas, protocolos de medição e aplicações desses sensores têm sido apresentadas (LÜTH; IBACH, 2003). A introdução comercial dos sensores ópticos foi inicialmente lenta em decorrência de seu alto custo e do número limitado de componentes adequados para uso. Esse cenário começou a mudar quando o número de componentes disponíveis aumentou e o custo desses itens caiu significativamente ao longo dos anos. Além disso, a qualidade e confiabilidade desses componentes também foi melhorada (UDD; SPILLMAN-JR, 2011). Ao longo dos anos, muitos elementos para aplicações em sensores de fibra óptica passaram a ser desenvolvidos e abriram uma gama de possibilidades para projetos cada vez mais sofisticados e com menores custos (LI et al., 2012; UDD; SPILLMAN-JR, 2011).

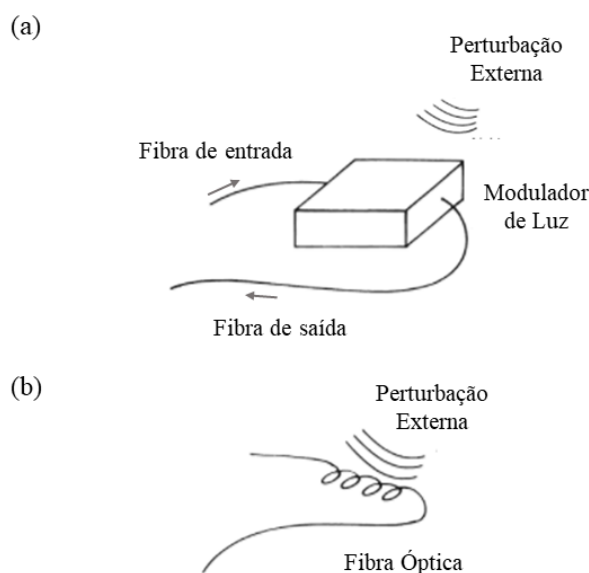
A luz é um campo eletromagnético de alta frequência (YIN; RUFFIN, 2002). Em geral, a radiação eletromagnética pode ser caracterizada pela direção do campo elétrico (polarização), dependência do tempo, fase, frequência ou comprimento de onda, e pela amplitude ou intensidade da luz (GAUGLITZ, 2005). Quando um campo eletromagnético é guiado ao longo de uma fibra óptica, esses parâmetros podem ser modulados em decorrência de fenômenos externos, sejam de natureza física, química, biológica, ou outro (UDD; SPILLMAN-JR, 2011). Nesse caso, a fibra óptica pode atuar como elemento transdutor para que as alterações do campo eletromagnético ocorram, ou guiar a luz para uma região de interação onde a luz será modulada (CULSHAW, 1983; RIBEIRO, 2011). A mensuração da grandeza de interesse no sensoriamento é feita a partir da medição do parâmetro variante da luz associado a essa grandeza.

Os sensores a fibra óptica possuem características inerentes que os tornam vantajosos em relação aos sensores eletrônicos tradicionais (UDD; SPILLMAN-JR, 2011). Algumas dessas vantagens são (UDD; SPILLMAN-JR, 2011; LI et al., 2012; LEE, 2003): (i) possuem imunidade a interferência eletromagnética e são estruturas passivas que, portanto, não conduzem

corrente elétrica; (ii) são capazes de operar em ambientes severos, como ambientes de alta temperatura, alta pressão, e ambientes corrosivos; (iii) apresentam desempenho excelente, como alta sensibilidade e ampla largura de banda; (iv) são de tamanho pequeno e baixo peso; (v) podem operar a longa distância; e (vi) podem fazer medidas multiplexadas ou distribuídas.

Comumente, os sensores de fibra óptica são categorizados em sensores extrínsecos e intrínsecos (CULSHAW, 2000). Essa classificação decorre do modo de detecção desses sensores (UDD; SPILLMAN, 2011). A Figura (5) ilustra o princípio de detecção dos sensores extrínsecos e intrínsecos.

Figura 5 – Ilustração do princípio geral de detecção dos sensores a fibra óptica (a) extrínsecos e (b) intrínsecos. (UDD; SPILLMAN-JR, 2011).



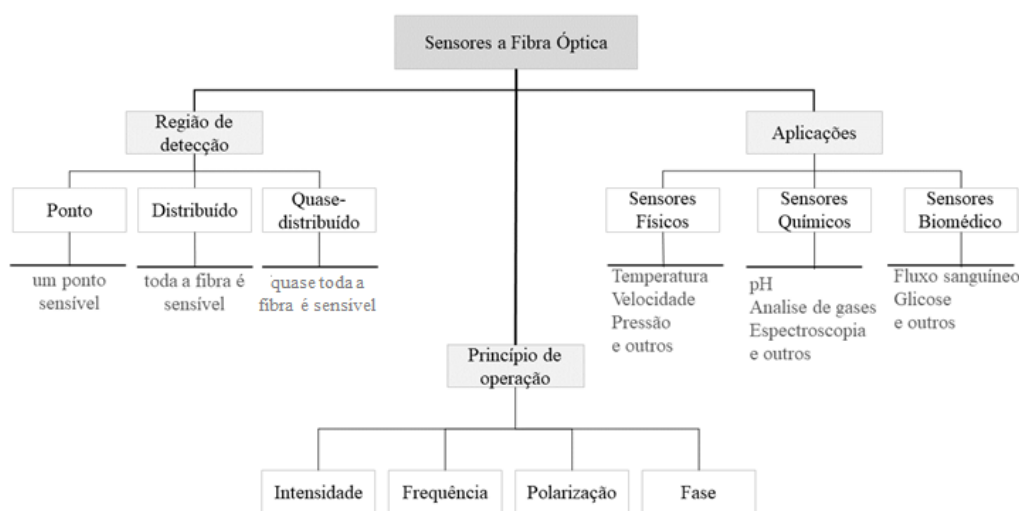
Fonte: adaptado de UDD e SPILLMAN JR (2007)

São sensores extrínsecos aqueles em que a detecção ocorre numa região externa à fibra óptica. Nessa classe de sensores, a luz é guiada até uma região de interação na qual a luz é modulada em resposta a fenômenos externos, e a radiação modulada é transmitida de volta para o receptor (Figura 5-a) (CULSHAW, 2000). Nesse contexto, a fibra óptica desempenha apenas o papel de transmitir a radiação até a região de detecção e, posteriormente, ao receptor. Nos sensores a fibra óptica intrínsecos a região de detecção é dentro da própria fibra, ou seja, a modulação da luz ocorre no interior da fibra óptica (Figura 5- b). Nessa situação, as propriedades ópticas da fibra são alteradas em virtude de eventos externos, e essas alterações modulam a luz que passa na fibra (UDD; SPILLMAN-JR, 2011).

Os sensores a fibra óptica podem ainda ser categorizados de acordo com outros parâmetros, tais como região de detecção, princípio de operação e aplicações, conforme ilustra

a Figura (6) (LI et al., 2012). Quanto a região de operação, os sensores a fibra óptica podem ser de ponto, distribuídos e quase-distribuídos (ou multi-pontos). O princípio de operação desses sensores refere-se às propriedades da radiação eletromagnética que são modificadas por fenômenos físicos, químicos ou biológicos externos. Os referidos fenômenos podem designar as aplicações desses sensores.

Figura 6 – Classificação dos Sensores a Fibra Óptica em três categorias: região de detecção, princípio de operação e aplicação (LI et al., 2012).



Fonte: adaptado de LI et al. (2012)

3.2.1 Sensores a fibra óptica distribuídos

A introdução comercial e desenvolvimento dos sensores ópticos foi dificultada pelo alto custo desses sensores. Isso se deveu ao fato de o número de componentes óptico-eletrônicos adequados para uso era limitado, e o preço desses itens era elevado. Desse modo, a ideia de obter o perfil de uma grandeza ao longo da distribuição espacial por meio de uma única fibra óptica (ou um par de fibras) foi tida como atraente (BOLOGNINI; HARTOG, 2013; KINGSLEY, 1986).

O desenvolvimento dos sensores a fibra óptica distribuídos não deve-se apenas aos custos reduzidos desses sistemas, mas a um conjunto de fatores. Dentre esses fatores, pode-se destacar o grande número de aplicações potenciais, e a própria natureza desses sensores, que permite detectar diversos efeitos ao longo de todo o comprimento da fibra. (KINGSLEY, 1986; YIN; RUFFIN, 2002; DAKIN, 1993). Além disso, a tecnologia de sensores distribuídos, em geral, apresenta diversas vantagens em relação aos seus concorrentes convencionais (KINGSLEY, 1986). A capacidade de realizar medidas distribuídas é, sem dúvida, uma das características mais importantes dos sensores a fibra óptica (YIN; RUFFIN, 2002).

Os sensores a fibra óptica distribuídos são da classe dos sensores intrínsecos (UDD; SPILLMAN-JR, 2011). Esses sensores consistem num comprimento longo de fibra, sem ramificações, no qual a modulação da luz, em decorrência de alterações externas localizadas, ocorre no interior da fibra (DAKIN, 1993). Contudo, para obter a distribuição espacial da grandeza de interesse, faz-se necessário adotar técnicas e protocolos de detecção específicos (GRATTAN; SUN, 2000; BOLOGNINI; HARTOG, 2013). Muitos sensores distribuídos operam através de técnicas de reflectometria óptica, tais como reflectometria óptica no domínio do tempo (OTDR - *Optical Time-Domain Reflectometry*) (GRATTAN; SUN, 2000). O método OTDR utiliza a diferença de tempo entre um sinal pulsado transmitido ao longo de uma fibra óptica, e o sinal refletido, originado por algum efeito na propagação da onda, para determinar a posição em que tal evento ocorre. Esses efeitos são decorrentes de perturbações na fibra e podem ter origens diversas (KERSEY; DANDRIDGE, 1988; GRATTAN; SUN, 2000; DAKIN, 1993). Esse princípio foi explorado pela primeira vez em sistemas distribuídos por A. J. Rogers, em 1980 (ROGERS, 1980). Rogers propôs uma extensão da técnica OTDR, designada reflectometria óptica no domínio do tempo de polarização (POTDR- *polarization optical time domain reflectometry*), para determinar a distribuição espacial da birrefringência de fibras monomodo (ROGERS, 1980). O uso da técnica OTDR em sensores de temperatura distribuídos foi primeiramente proposto e demonstrado por A. H. Hartog e D. N. Payne (1982).

Os sensores distribuídos têm sido amplamente utilizados na detecção de temperatura baseada em efeitos ópticos não lineares, tais como espalhamento Raman e Brillouin (GRATTAN; SUN, 2000). Esses efeitos, em fibras ópticas, oferecem vantagens únicas aos sensores distribuídos, pois apresentam diversidade de resposta aos estímulos externos e tornam-se, assim, atraentes para o desenvolvimento de novos sensores com diversas aplicações (GRATTAN; SUN, 2000; ROGERS et al., 1998). Um método muito aplicado é o retroespalhamento de luz empregando a técnica OTDR, no qual a informação de interesse é obtida a partir de campos retroespalhados. Esse método mostra-se vantajoso pois apresenta alta sensibilidade e operação a partir de uma única extremidade da fibra óptica. Contudo, a desvantagem desse método é a baixa intensidade de sinal e, por consequência, o longo tempo de resposta devido à necessidade de integrar muitos pulsos (ROGERS et al., 1998).

Os sensores de fibra óptica distribuídos são particularmente interessantes para sistemas em que uma única grandeza precisa ser monitorada ao longo de muitos pontos, ou continuamente (YIN; RUFFIN, 2002). Algumas aplicações são especialmente significativas para a indústria e para a comunidade científica (BOLOGNINI; HARTOG, 2013). Alguns exemplos de aplicações desses sensores são: monitoramento de deformações mecânicas e vibrações em grandes estruturas; dosimetria de radiação nuclear, detecção de gases, monitoramento de corrosão em estruturas metálicas; detecção de incêndios e monitoramento de temperatura, detecção de campo elétrico/magnético (KINGSLEY, 1986; YIN; RUFFIN, 2002; GRATTAN; SUN, 2000).

3.3 Técnicas de Reflectometria óptica

A reflectometria óptica é uma técnica comumente utilizada para caracterizar dispositivos e sistemas ópticos (SHADARAM, 1984). Essa técnica é baseada na reflexão de luz ao longo de um guia de onda, tal como fibra óptica, para determinar perdas de potência óptica em toda a extensão de propagação, localizar defeitos, avaliar emendas de fibras e outras anomalias (RIBEIRO, 1999). Quando uma luz é propagada ao longo de uma fibra óptica, a reflexão de luz em direção ao início da fibra pode acontecer em decorrência de dois efeitos: (i) reflexão de Fresnel, ocasionada por uma mudança no índice de refração do meio; e (ii) espalhamento Rayleigh, causado por variações microscópicas no índice de refração do núcleo da fibra (SHADARAM, 1984). As técnicas de reflectometria óptica mais populares são a reflectometria óptica no domínio da frequência (OFDR - *Optical Frequency Domain Reflectometry*), reflectometria óptica de baixa coerência (OLCR - *Optical Low Coherence Reflectometry*), e reflectometria óptica no domínio do tempo (OTDR - *Optical Time-Domain Reflectometry*)(RIBEIRO, 2011).

A OFDR (MACDONALD, 1981) utiliza a frequência resultante da interferência entre dois sinais ópticos de frequências distintas para determinar a coordenada espacial em que um evento ocorre. Esse método utiliza uma portadora CW modulada por uma fonte de referência e varredura linear (MACDONALD, 1981). A interferência entre o sinal refletido em decorrência de um evento e o sinal da fonte de referência produz um sinal óptico de correlação no domínio da frequência que é observado num analisador de espectro elétrico (MACDONALD, 1981; SHADARAM, 1984). Essa frequência resultante é proporcional à distância ao longo da fibra (MACDONALD, 1981). As técnicas OFDR, em geral, apresentam resolução espacial da ordem de milímetros com alta sensibilidade e faixa dinâmica (WEID; PASSY; GISIN, 1997; DUNCAN et al., 2007).

A técnica OLCR, assim como a OFDR, baseia-se no fenômeno de interferometria óptica, e pode apresentar uma resolução micrométrica (GILGEN et al., 1989). Nesse método, o sinal de correlação é obtido usando um interferômetro de Michaelson e uma fonte de baixa coerência (TAKADA et al., 1987; LIMBERGER et al., 1993). A luz da fonte é dividida em duas: um feixe de referência que é lançado em direção a um braço com linhas de atraso e espelho no final, e um feixe lançado sobre a amostra de investigação (braço do sistema óptico de teste). O espectro resultante que caracteriza a amostra é obtido a partir da sobreposição de ambas as ondas (LIMBERGER et al., 1993; GILGEN et al., 1989; SORIN; BANEY, 1992). A OLCR tem sido usada em diversas aplicações, dentre as quais destacam-se tecnologias para diagnóstico médico (MASTERS, 1999; JEDRZEJEWSKA-SZCZERSKA et al., 2004).

No caso da técnica OTDR, pulsos ópticos de curta duração são emitidos numa extremidade do dispositivo sob teste, e o sinal refletido é observado. A caracterização, identificação e localização de anomalias do sistema óptico podem ser obtidas a partir da intensidade e do atraso temporal da luz refletida (DANIELSON, 1982). Um equipamento comumente utilizado para diagnosticar enlaces de fibras ópticas baseado nessa técnica é o reflectômetro óptico no domínio do tempo, conhecido pela sigla OTDR, do inglês *optical*

time-domain reflectometer. Atualmente, uma grande variedade de modelos de OTDR estão comercialmente disponíveis.

A técnica OTDR é amplamente utilizada em sistemas de detecção distribuída de temperatura de curtas e longas distâncias (maiores que 30 Km) (BOLOGNINI; HARTOG, 2013). Nos sensores distribuídos de temperatura baseado no espalhamento Raman, esse método permite a detecção e análise do sinal restroespalhado Raman anti-Stokes que carrega informação de temperatura do sistema, assim obtendo a distribuição espacial de temperatura (KERSEY; DANDRIDGE, 1988). As medições que serão apresentadas no Capítulo 4 também são baseadas na OTDR.

3.3.1 *Reflectometria óptica no domínio do tempo*

A técnica OTDR foi primeiramente proposta por M. Barnoski e S. Jensen, em 1976. Os autores evidenciaram a partir de resultados experimentais que as características de atenuação em fibras ópticas podem ser determinadas a partir da análise de luz restroespalhada na fibra (BARNOSKI; JENSEN, 1976). Não somente as atenuações em fibras podem ser mensuradas, mas também é possível medir o comprimento de uma fibra óptica, identificar defeitos, falhas e outras anomalias em qualquer ponto de uma fibra óptica (DANIELSON, 1982). Atualmente, a técnica OTDR é amplamente aplicada e tornou-se indispensável na caracterização e manutenção de sistemas de transmissão por fibra óptica (RIBEIRO, 2011).

Na OTDR, vários pulsos intensos e estreitos são lançados numa fibra óptica de comprimento L , e o sinal de retorno em direção ao início da fibra é observado a fim de caracterizar o enlace óptico. A luz de retorno pode ser originada pela reflexão de Fresnel e pelo espalhamento Rayleigh. Os sinais refletidos carregam informações características da fibra, tais como perda da potência óptica, pontos com defeitos, emendas, conectores e outros. A porção refletida é originada principalmente pelo Espalhamento Rayleigh, em que parte da luz espelhada é guiada em direção ao início da fibra (LEFAROV; MURAV'EV; MITIN, 1988). Essa fração da luz que se propaga em direção oposta a de incidência é o sinal restroespalhado. As variações de intensidade do sinal restroespalhado e a diferença temporal entre a emissão de um pulso e detecção do sinal de retorno, permitem determinar o coeficiente de espalhamento ou atenuação ao longo do comprimento da fibra (YIN; RUFFIN, 2002).

Ao emitir um pulso com duração τ e energia E_0 na entrada de uma fibra óptica, a potência do sinal restroespalhado P_S em função da posição z na fibra é dada por (BOLOGNINI; HARTOG, 2013)

$$P_S = \frac{1}{2} P_0 \alpha_s(z) v_g S(z) \exp\left(-2 \int_0^z \alpha(\zeta) d\zeta\right), z \in [0, L]; \quad (6)$$

em que $P_0 = E_0/\tau$ é a potência incidente na entrada da fibra ($z = 0$), S é o fator de captura, v_g é a velocidade de grupo do pulso que se propaga ao longo da fibra, α_s e α são os coeficientes de espalhamento Rayleigh e atenuação, respectivamente. O parâmetro S é a fração da luz espalhada capturada pela fibra óptica e guiada em sentido contra-propagante e está relacionado ao tipo de

fibra (monomodo ou multimodo) na qual a luz é transmitida (BOLOGNINI; HARTOG, 2013). O coeficiente de espalhamento α_s na localização está relacionado ao estado da fibra, alterações externas localizadas podem ser identificadas ao explorar esse fator (YIN; RUFFIN, 2002).

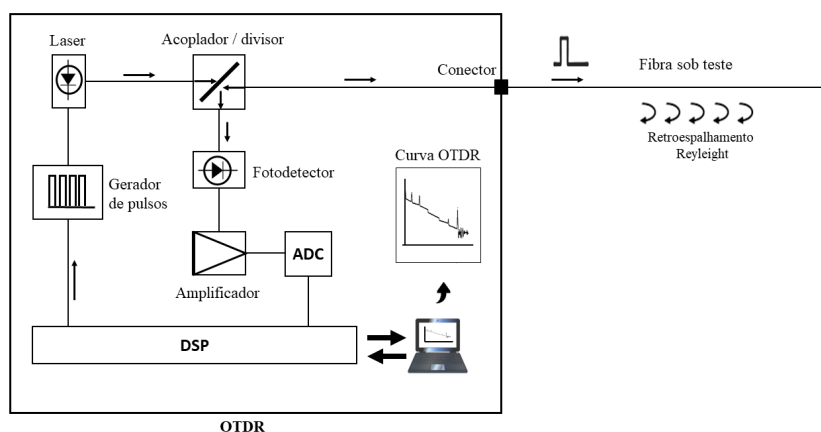
A coordenada espacial z está relacionada ao intervalo de tempo Δt entre a emissão do pulso e o sinal refletido detectado através da expressão (ROSSETTO et al., 2004)

$$z = \frac{c}{2n} \Delta t, \quad (7)$$

em que c é a velocidade de propagação da luz no vácuo, e n é o índice de refração do núcleo da fibra. Como essas quantidades são precisamente estabelecidas, a posição z onde a luz foi espalhada pode ser determinada conhecendo Δt (BOLOGNINI; HARTOG, 2013).

Até a obtenção dos resultados finais, a técnica OTDR envolve diferentes processos, tais como amplificação, processamento digital de sinais, conversão analógico-digital e outros. A Figura 7 esquematiza os principais processos envolvidos na interrogação de fibra óptica via OTDR.

Figura 7 – Esquematização de testes em fibras ópticas usando OTDR (BOLOGNINI; HARTOG, 2013).

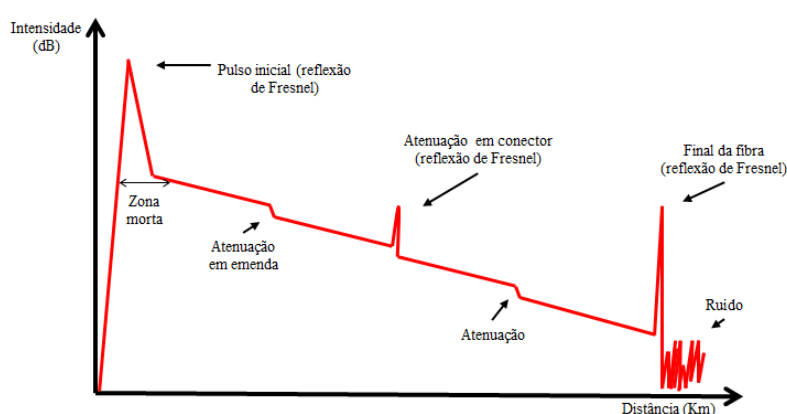


Fonte: Adaptado de BOLOGNINI e HARTOG (2013)

A fonte de luz envia pulsos consecutivos e de curta duração para a fibra sob teste. A fonte consiste em um laser diodo vinculado a um gerador de pulsos regulado por uma unidade de controle. Em geral, nos equipamentos OTDR comerciais, a largura de pulso pode ser estabelecida pelo operador de acordo com as condições de medição, e opções disponíveis do equipamento. Além disso, é comum tais aparelhos disporem de mais de um laser com comprimentos de onda diferentes nas faixas de transmissão por fibra óptica para atender diferentes demandas. Os pulsos são inseridos na fibra por meio de um acoplador/divisor direcional de três portas ou um circulador óptico. A luz de retorno é direcionada pelo acoplador/divisor para um fotodetector, que converte o sinal óptico em sinal elétrico. Em seguida, esse sinal é amplificado e filtrado. Por fim, o sinal

resultante passa por uma seção de controle e processamento, na qual os dados são armazenados, e as distâncias dos pontos de luz refletidas e espalhadas são calculadas (NETTEST, 2000). Nessa etapa, o sinal passa por um conversor analógico-digital (ADC - *analog-to-digital converter*), e é processado por um processador digital de sinais (DSP - *digital signal processor*) (BOLOGNINI; HARTOG, 2013). O resultado obtido nesses processos é a distribuição espacial dos eventos na fibra óptica sob teste. No OTDR, um *display* exibe a curva de intensidade do sinal retroespalhado ao longo do comprimento da fibra. Um resultado típico obtido por um OTDR está ilustrado na Figura 8. Esse resultado é comumente designado por Curva OTDR ou Traço-OTDR. Pode-se

Figura 8 – Resultado típico de medição usando OTDR.



Fonte: próprio autor.

observar na Figura 8 a intensidade dos sinais espalhados, e os locais em que há emendas e conectores no enlace óptico. Além disso, são destacados os pontos em que ocorre reflexão de Fresnel.

Um aspecto importante do OTDR é o sensor utilizado para detectar o sinal retroespalhado. Esse sensor é um fotodetector que mede o nível de potência da luz retroespalhada proveniente da fibra sob teste. Nos equipamentos OTDR, os sensores são projetados para medir níveis de intensidade extremamente baixos de luz retroespalhada em uma faixa de banda larga. Essas características do sensor OTDR tornam possível detectar sinais retroespalhados em faixas de comprimentos de ondas diferentes do espalhamento Rayleigh, tais como as bandas Stokes e anti-Stokes do retroespalhamento Raman.

O desempenho da técnica OTDR pode ser avaliado de acordo com algumas especificações: faixa dinâmica de operação, zona morta e resolução (KEISER, 2014; NETTEST, 2000). A faixa dinâmica de operação do OTDR indica a máxima e mínima intensidade de luz detectável e está relacionada à distância máxima para a qual eventos podem ser medidos com precisão. É estabelecida pela combinação entre a fonte de luz e o fotodetector, de modo que, quanto mais intensa for a luz da fonte e mais sensível o detector, melhor a faixa dinâmica de operação. Quando esse parâmetro é insuficiente para as condições de medição, o sinal obtido é ruidoso e impreciso,

e portanto dificulta a localização de efeitos. A faixa dinâmica de um OTDR é determinada pela diferença entre o nível de potência retroespalhada no início da fibra e o nível do ruído (KEISER, 2014; NETTEST, 2000).

A região espacial no *link* da fibra na qual não é possível detectar ou localizar eventos com precisão recebe o nome de zona morta. Essa região está relacionada a saturação do fotodiodo. O detector é projetado para operar sobre uma certa faixa de potência, que deve incluir as potências tipicamente baixas dos sinais retroespalhados. Quando uma reflexão de alta intensidade acontece, tal como reflexão de Fresnel, o detector satura e necessita de certo tempo para recuperar a sensibilidade. Durante esse tempo, os sinais retroespalhados não são detectados e o comprimento referente a esses retornos não pode ser caracterizado (ver Figura 8). A zona morta pode ser reduzida com a diminuição da largura do pulso emitido. Entretanto, a redução da largura de pulso implica em diminuição da faixa dinâmica de operação. Em síntese, pode-se dizer que a zona morta refere-se ao comprimento da fibra ao longo do qual o nível de intensidade da reflexão de Fresnel impede a detecção dos sinais retroespalhados (ZÓLOMY, 2010). Esse problema pode ser resolvido realizando duas medições com maior e menor largura de pulso. A medição com menor largura de pulso permite testar o trecho não caracterizado quando pulsos mais largos são utilizados, e os trechos mais distantes podem ser testados usando maior largura de pulso. Alternativamente, a faixa zona morta pode ser evitada introduzindo um comprimento de fibra no início do enlace óptico de teste. O comprimento da fibra deve ser suficientemente grande para superar o região de zona morta.

A resolução designa a capacidade que um sistema OTDR apresenta de diferenciar eventos, e é um dos parâmetros mais importantes na caracterização e avaliação de um OTDR. Pode-se destacar dois tipos de resolução: resolução de perdas e resolução espacial. A resolução de perdas indica a diferença mínima entre os níveis de potências retroespalhadas de dois pontos de medição, que podem ser distinguidos. A resolução espacial está relacionada à habilidade do sistema de detecção do OTDR em detectar eventos numa fibra que estão espacialmente próximos, ou seja, é a distância mínima entre dois pontos adjacentes que o equipamento pode distinguir. A resolução espacial é uma função da largura temporal do pulso transmitido na fibra óptica sob teste, de modo que pulsos mais estreitos implicam em maior resolução espacial da medição. A resolução espacial também está relacionada com a capacidade do OTDR localizar o final da fibra, uma vez que, se o registro de eventos ocorre a cada metro, o final da fibra tem a imprecisão de um metro ($\pm 1m$) (KEISER, 2014; NETTEST, 2000).

3.4 Aspectos básicos dos sistemas de detecção distribuída de temperatura baseado em espalhamento Raman

O espalhamento Raman é caracterizado pela emissão de radiação de frequência deslocada, resultante da interação entre uma luz intensa e as moléculas do meio material no qual a luz se propaga (RAMAN; KRISHNAN, 1928). A mudança de frequência está diretamente relacionada às frequências de vibração dessas moléculas. Além disso, as características espectrais resultantes

desses processos de interação e trocas de energia são determinadas pelos constituintes do material. Desse modo, o espectro de retroespalhamento Raman também depende do material em que a luz se propaga (BOLOGNINI; HARTOG, 2013). No caso da fibra óptica, o espectro do retroespalhamento Raman é largo e exibe um pico em torno de 13 THz (AGRAWAL, 2000; RAMASWAMI; SIVARAJAN; SASAKI, 2009; BOYD, 2007). As intensidades das componentes espalhadas Raman Stokes (I_S) e Raman anti-Stokes (I_{AS}) estão relacionadas à temperatura absoluta do meio de interação como descrito na Seção 2.2, e podem ser expressadas por (BOLOGNINI; HARTOG, 2013)

$$I_{AS}(T) = K_{AS} \frac{1}{e^{\frac{h\Delta\nu}{K_B T}} - 1}, \quad (8)$$

$$I_S(T) = K_S \left(\frac{1}{e^{\frac{h\Delta\nu}{K_B T}} - 1} + 1 \right), \quad (9)$$

em que h e K_B são as constantes de Planck e Boltzman, respectivamente, e $\Delta\nu$ corresponde ao deslocamento Raman em frequência, em Hertz. Os termos K_S e K_{AS} são constantes e estabelecem uma relação de dependência entre o comprimento de onda e a intensidade de espalhamento. Essas constantes podem ser calibradas usando uma temperatura conhecida em um local específico da fibra (BOLOGNINI; HARTOG, 2013). Nas fibras ópticas de sílica-germânio, em temperatura ambiente, a sensibilidade da intensidade em relação à temperatura do sinal anti-Stokes é de aproximadamente 0,8 %/K, enquanto para o sinal Stokes é de apenas 0,1 %/K (BOLOGNINI; HARTOG, 2013). Essa forte dependência da temperatura do sinal anti-Stokes permite a implementação de sensores distribuídos de temperatura baseados em espalhamento Raman (SDT-R) (DAKIN, 1993).

Os sistemas de detecção distribuída de temperatura a partir do Efeito Raman baseiam-se no monitoramento do sinal retroespalhado Raman anti-Stokes em função da distância ao longo da fibra (BASSAN et al., 2015). Se a razão entre as intensidades anti-Stokes e Stokes for medida, pode-se obter a distribuição espacial de temperatura absoluta ao longo de toda a fibra sensora (DAKIN, 1993). Essa razão em função da temperatura é dada por (DAKIN, 1993)

$$R(T) = \frac{I_{AS}}{I_S} = \left(\frac{\lambda_S}{\lambda_{AS}} \right)^4 \exp \left(\frac{-h\Delta\nu}{K_B T} \right), \quad (10)$$

em que λ_S e λ_{AS} são os comprimentos de onda Stokes e anti-Stokes, respectivamente. Como o espectro Raman é amplo, o valor de deslocamento Raman ($\Delta\nu$) da Equação 10 é comumente determinado pela faixa de frequência do espectro transmitido por filtros, utilizados para separar a banda de interesse. Embora as informações de temperatura sejam extraídas particularmente do sinal anti-Stokes, o sinal Stokes é usado como referência para eliminar efeitos degradantes comuns a ambos os sinais, tais como variações de potência do sinal de bombeio e perda de propagação (BOLOGNINI; HARTOG, 2013).

O uso da Equação (10) para obtenção do perfil de temperatura em sistemas SDT-R é atrativo, pois a Equação (10) independe da potência do laser de bombeio, das alterações do sinal

transmitido ao longo da propagação na fibra, e da composição da fibra (exceto nos casos em que ocorre fluorescência) (DAKIN, 1993). No entanto, essa expressão não considera a atenuação diferencial dos sinais Stokes e anti-Stokes.

A perda de potência óptica dos campos espalhados depende do comprimento de onda do sinal óptico. Desse modo, as ondas Stokes e anti-Stokes, cuja separação entre comprimentos de ondas é cerca 200 nm, sofrem atenuações ópticas diferentes ao se propagarem através da fibra óptica. No caso de longos comprimentos de fibra, essa perda diferencial não pode ser desprezada. Em vista disso, as potências ópticas dos campos Stokes e anti-Stokes precisam ser corrigidas antes da aplicação da Equação (10) com o propósito de evitar erros na medida de temperatura (DAKIN, 1993).

A potência óptica incidente no detector do sinal retroespalhado anti-Stokes e stokes na distância z pode ser escrita como (BOLOGNINI et al., 2007; BOLOGNINI; HARTOG, 2013)

$$P_{AS}(z) = T_{AS} \frac{W}{2} R_{AS}(z) P_0 \exp \left(- \int_0^z \alpha(\zeta) + \alpha_{AS}(\zeta) d\zeta \right) \quad (11)$$

$$P_S(z) = T_S \frac{W}{2} R_S(z) P_0 \exp \left(- \int_0^z \alpha(\zeta) + \alpha_{AS}(\zeta) d\zeta \right), \quad (12)$$

em W é a largura de pulso, P_0 é a potência incidente na entrada da fibra ($z=0$), em que α_{AS} e α_S são os coeficientes de perdas das ondas anti-Stokes e Stokes, respectivamente. As quantidades T_{AS} e T_S são os valores de transmissividade no final do receptor para luz AS e S, respectivamente. $R_{AS}(z)$ $R_S(z)$ são os coeficientes de retroespalhamento Raman anti-Stokes e stokes na posição z , respectivamente. Os termos $R_{AS}(z)$ $R_S(z)$ são proporcionais ao inverso do comprimento de onda ($\propto 1/\lambda_{AS/S}$) e a sessão de choque do espalhamento Raman anti-Stoke e stokes, respectivamente.

Levando em conta as perdas de propagação em fibra óptica, a distribuição de temperatura dada pela razão entre as intensidades dos sinais retroespalhados anti-Stokes e Stokes é derivada da razão entre $P_{AS}(z)$ e $P_S(z)$. Assim, $R(T,z)$ é expressada por

$$R(T, z) = \frac{I_{AS}}{I_S} = \left(\frac{\lambda_S}{\lambda_{ST}} \right)^4 \exp \left(\frac{-h\Delta\nu}{K_B T} \right) \exp \left(- \int_0^z \alpha_{AS}(\zeta) - \alpha_S(\zeta) d\zeta \right). \quad (13)$$

Ou seja, a correção da Equação (10) pode ser feita através da introdução de um termo exponencial levando em conta as atenuações sofridas pelas bandas do espalhamento Raman. Em muitos sistemas SDT-R simples, o termo referente à atenuação diferencial na Equação (13) é admitido independente da posição e invariante com tempo (BOLOGNINI; HARTOG, 2013). Entretanto, essa consideração só pode ser feita para temperatura inferiores à 120°C (BOLOGNINI; HARTOG, 2013).

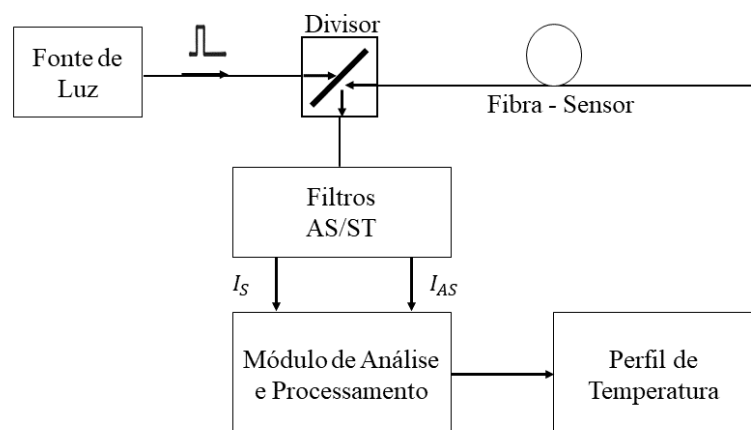
As potências dos sinais retroespalhados anti-Stokes e stokes, dadas pelas equações (11) e (12), são dependentes da largura do pulso injetado na fibra e da potência incidente. Mantendo os demais termos dessas equações invariantes, a potência óptica incidente no detector deve ser maior para pulsos mais largos. A pesar disso, a dependência da largura de pulso e da potência incidente é eliminadas no processo de obtenção da equação (13).

Na literatura, encontram-se diversos trabalhos com metodologias diferentes para a correção da perda diferencial, tais como técnicas para medida de perdas, técnicas de auto-calibração do sistema e correções das perdas de potências ópticas dos sinais da Equação (10) (HARTOG, 2007; ROSSETTO et al., 2004; DAKIN, 1993; RIBEIRO, 2011).

Muitos dos sistemas SDT-R propostos são baseado na reflectometria óptica no domínio do tempo (BASSAN et al., 2015). Através da técnica OTDR, os fótons contra-propagantes oriundos do Espalhamento Raman podem ser detectados, e as intensidades dos campos retroespalhados Raman Stokes e anti-Stokes, em função da distância na fibra óptica, podem ser monitorados individualmente. Como as alterações da temperatura em pontos externos à fibra modulam a intensidade do sinal anti-Stokes, a curva OTDR referente a esse sinal deve fornecer os pontos em que ocorrem variações da intensidade relacionada à temperatura.

A configuração básica dos sensores de temperatura baseados no Efeito Raman está esquematizada na Figura 9. No sistema da Figura 9, uma fonte de luz insere pulsos num link de fibra óptica sensora por meio de um divisor (ou circulador). A fonte de luz consiste num laser diodo, cuja luz é modulada em amplitude. Os pulsos de luz estimulam o espalhamento Raman, no qual as bandas Stokes e anti-Stokes são geradas. O divisor, envia os campos retroespalhados, que se propagam em sentido oposto ao do pulso, para um módulo de análise. O sinal recebido contém as componentes Rayleigh, Brillouin e Raman do espalhamento da luz. Desse modo, faz-se necessário a utilização de filtros para separar as potências individuais dos campos Stokes e anti-Stokes. Os sinais recebidos são monitorados no domínio do tempo e processados. Por fim, o perfil de temperatura do sistema pode ser obtido por meio da Equação (10) para o caso em que as correções de atenuação diferencial são supridas, ou ainda através da Equação (13).

Figura 9 – Arranjo típico dos sensores distribuídos de temperatura baseado no Efeito Raman em fibras ópticas.



Fonte: próprio autor.

A distribuição de temperatura também pode ser obtida realizando uma calibração de

temperatura (BASSAN et al., 2015). Nesse cenário, mede-se a intensidade do sinal Raman anti-Stokes retroespalhado em função da distância na fibra óptica para temperaturas controladas (conhecidas). Isso pode ser feito introduzindo um termostato em regiões de aquecimento da fibra sensora, e os níveis de intensidade do Raman anti-Stokes são utilizados para determinar a expressão que relaciona a intensidade medida e temperatura do ambiente externo. Desse modo, é possível obter o perfil de temperatura medido. Além disso, faz-se uso de uma curva de referência à temperatura ambiente para normalizar o sinal (BASSAN et al., 2015).

A potência óptica do Raman anti-Stokes retroespalhado é tipicamente baixa e, conseqüentemente, apresenta baixa razão sinal-ruído (*SNR - signal-to-noise ratio*) (BASSAN et al., 2016). A fim de melhorar a performance dos sistemas SDT-R, módulos de amplificação óptica têm sido adicionados aos arranjos típicos desses sensores. Em adição, alguns mecanismos, tais como técnicas de codificação, têm sido implementados para melhorar a SNR do sinal retroespalhado (BASSAN et al., 2015; BOLOGNINI et al., 2007).

O desempenho dos sistemas SDT-R pode ser avaliado com base em quatro critérios: (i) resolução espacial, (ii) resolução de temperatura, (iii) alcance e (iv) tempo de medição (BOLOGNINI et al., 2007).

A resolução espacial do sensor define a capacidade de identificar eventos em pontos adjacentes. A resolução espacial é afetada pelo comprimento da fibra, já que em fibra maiores o sinal retroespalhado é mais atenuado. Isso implica na degradação da SNR e, portanto, da resolução de temperatura. Por outro lado, a resolução espacial pode ser melhorada com a diminuição da largura de pulso, o que implica na redução da potência óptica do pulso transmitido. Em consequência disso, o sinal retroespalhado detectado é mais ruidoso. Desse modo, o sensor deve ser projetado para estabelecer um balanço entre a resolução espacial e de temperatura, a fim de otimizar o sistema de detecção (BOLOGNINI; HARTOG, 2013). Algumas ferramentas interessante que pode auxiliar a dimensionar corretamente esses parâmetros são algoritmos de otimização multiobjetivo. Atualmente, esses recursos estão bem consolidados e podem ser usados no projeto de sensores afim de otimizar a sensibilidade.

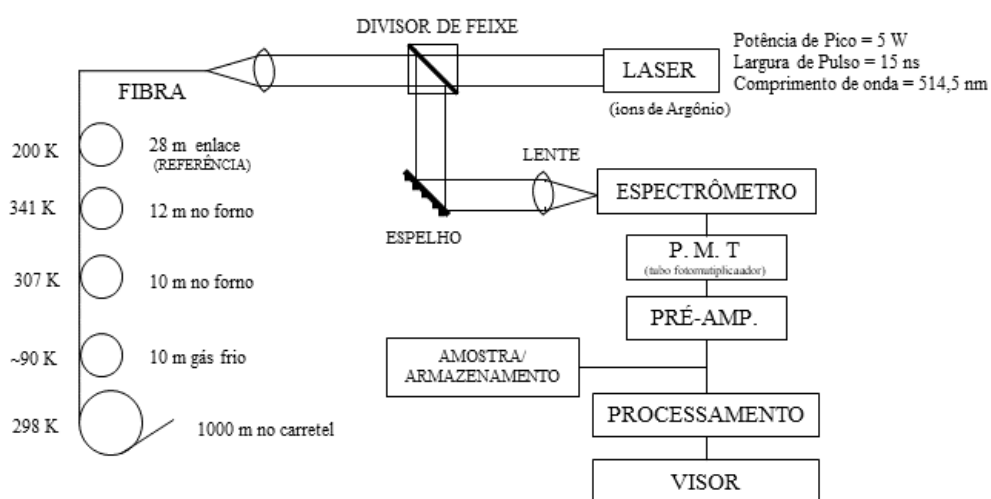
3.5 Sensores Distribuídos de Temperatura baseados em Espalhamento: revisão da literatura

Nesta seção são destacados alguns dos SDT-R baseados em reflectometria óptica no domínio do tempo. O desenvolvimento dos sensores distribuídos de temperatura, baseado em espalhamento Raman, teve início há mais de 30 anos. Em 1982, Hartog propôs um sensor distribuído para o monitoramento de temperatura a partir das variações de potência óptica de sinais retroespalhados em fibras ópticas (HARTOG; PAYNE, 1982). Nesse trabalho, foi utilizado como elemento sensor um tubo de sílica preenchido por líquido (fibra de núcleo líquido), e um laser à gás de alta potência para transmitir pulsos com 10 ns de duração. As fibras de núcleo líquido tinham um diâmetro aproximado de 300 μm e perdas típicas de 12-13 dB/Km. Os experimentos realizados demonstraram uma sensibilidade de 0,018 dB/K para distâncias maiores que 100 m (HARTOG; PAYNE, 1982). A sensibilidade foi observada a partir do aumento

do coeficiente de dispersão de Rayleigh com aumento da temperatura. Apesar das limitações que o sensor relatado apresentava, ele foi importante para o desenvolvimento dos sensores distribuídos de temperatura, pois mostrava a viabilidade de implementação desses sistemas. Os pesquisadores ingleses H. A. Hartog, J. P. Dakin e colaboradores foram os primeiros a propor arranjos experimentais para detecção distribuída de temperatura a partir do Espalhamento Raman (HARTOG; LEACH; GOLD, 1985; DAKIN et al., 1985a; DAKIN et al., 1985).

Em 1985, Dakin e colaboradores publicaram as primeiras medidas experimentais da distribuição de temperatura em fibras ópticas multimodo à base de sílica. O arranjo experimental proposto (Figura 10) utilizava a técnica OTDR para medir variações de intensidade do sinal Raman anti-Stokes retroespalhado em 1600 m de fibra com diferentes pontos de aquecimento. Nesse sistema, foi utilizado um *laser* à gás de alta potência, tal como laser de íons de Argônio, a fim de compensar as altas perdas de potência ópticas típicas das fibras da época (DAKIN et al., 1985a). No esquema da Figura 10, um laser de íons de Argônio, operando à 514,5 nm, emite pulsos de 15 ns. Os pulsos de luz são injetados no enlace de fibra por meio de um divisor de feixe. Os sinais retroespalhados são separados num espectrômetro e monitorados no domínio do tempo. Após módulos de amplificação e processamento, a curva da intensidade óptica em função da distância na fibra são obtidas. No mesmo ano (1985), os autores publicaram resultados empregando a mesma técnica, mas utilizando laser diodo como fonte e um fotodiodo avalanche como detector (DAKIN et al., 1985). A introdução desses elementos nos sistemas SDT-R possibilitou arranjos experimentais mais simples e medições mais precisas.

Figura 10 – Arranjo experimental do primeiro sensor distribuído de temperatura baseado no Espalhamento Raman proposto por Dakin et al. (1985). (DAKIN et al., 1985).



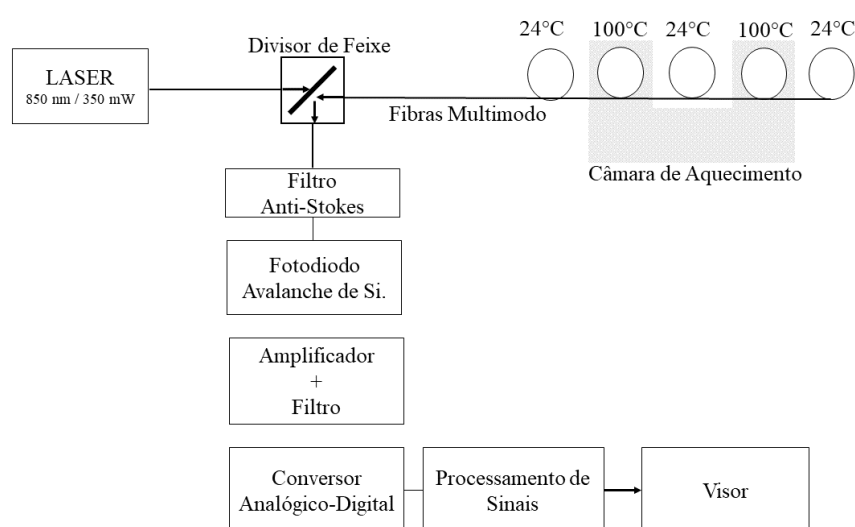
Fonte: adaptado de Dakin et al., (1985a).

Ainda em 1985, A. Hartog e colaboradores (HARTOG; LEACH; GOLD, 1985)

propuseram a implementação de um sensor de temperatura distribuído, baseado no Espalhamento Raman, utilizando laser e detector de semicondutores. Por meio de um arranjo compacto, os autores obtiveram resultados experimentais satisfatórios, com a diminuição da potência de bombeio necessária para maiores distâncias de operação. O sistema proposto tinha como objetivo monitorar intensidade do Raman anti-Stokes retroespalhado em decorrência de variações de temperatura em pontos independentes ao longo de uma única fibra como meio sensor. Para tal, foi utilizado um sistema OTDR-multimodo, com um laser semiconductor de 850 nm (Potência máxima de 350 mW), para injetar pulsos de 40 ns na fibra sensora, e um filtro óptico para selecionar o sinal anti-Stokes retroespalhado. O sinal filtrado era detectado por um fotodiodo avalanche de silício (Si) e posteriormente passava por módulos de amplificação, conversão análogica-digital e processamento. Nesse experimento, foram utilizados 1100 m de fibras multimodo de GeO_2 (dióxido de germânio) dispostas em 5 carretéis, dos quais dois foram inseridos em câmaras de aquecimento. A sensibilidade do sistema foi testada entre as temperaturas de $-51\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $+100\text{ }^{\circ}\text{C}$. Com o arranjo relatado (Figura 11), uma resolução de temperatura/espacial de $1\text{K}/7,5\text{m}$ foi alcançada, atingindo os indicativos teóricos.

Esse trabalho, foi de grande importância para o desenvolvimento dos sistemas SDT-R, pois estabeleceu o potencial comercial desses sensores, uma vez que foi implementado com dispositivos comerciais da década de 1980 (BOLOGNINI et al., 2007). Além disso, a configuração proposta por Hartog *et al.* (HARTOG; LEACH; GOLD, 1985), com algumas modificações, constitui estrutura básica dos SDT-R (baseados em OTDR) da atualidade.

Figura 11 – Esquemática do arranjo experimental proposto por Hartog et al. (1985) para detecção distribuída de temperatura baseado em espalhamento Raman usando a técnica OTDR (HARTOG; LEACH; GOLD, 1985).



Fonte: adaptado de Hartog et al., (1985).

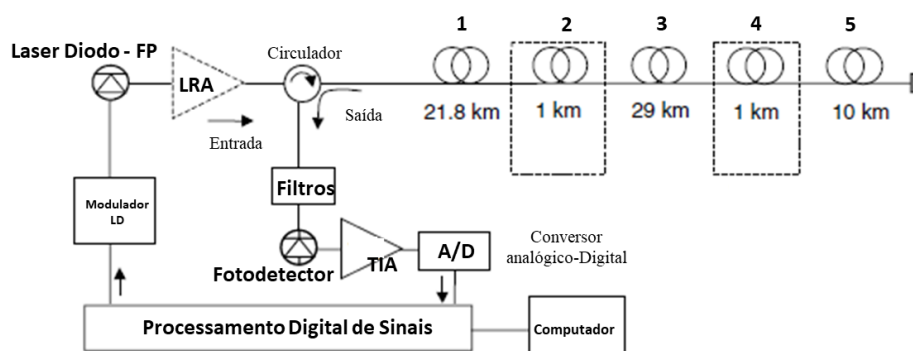
Após os trabalhos pioneiros de Hartog, Dakin e colaboradores na década de 1980, os

esforços se voltaram para o aumento da faixa de operação e melhoria da resolução dos SDT-R. Nesse sentido, os sensores de temperatura distribuídos passaram a operar a 1555 nm, onde a atenuação das fibras de sílica é mínima, em enlaces com dezenas de quilômetros de fibras monomodo (HARTOG, 1995). O uso desse tipo de fibra apresentava uma vantagem adicional, a de utilizar as fibras já empregadas em sistemas de comunicação para detecção distribuída de temperatura (HARTOG, 1995). Simultaneamente, alguns pesquisadores propuseram novas fontes para detecção distribuída de temperatura a partir de espalhamento Raman anti-Stokes (LEES et al., 1996). Além disso, amplificadores à fibra óptica, tal como amplificadores de fibra dopada a Érbio (EDFA – erbium doped fiber amplifier) passaram a integrar os *designs* de sistemas SDT-R (WAKAMI; TANAKA, 1994; GRATAN; SUN, 2000). Desde então, muitos trabalhos foram publicados apresentando diversas técnicas e protocolos de medição, a fim de aperfeiçoar os sistemas SDT-R, melhorando parâmetros como faixa de operação, sensibilidade, resolução espacial, custos, e outros (HÖBEL et al., 1995; BOLOGNINI et al., 2006; SOTO et al., 2007b; BARONTI et al., 2010; TANNER et al., 2011).

Sensores de temperatura distribuídos baseados no espalhamento Raman viáveis e econômicos, com faixa de medição total de 40 Km já foram analisados e testados (BOLOGNINI et al., 2007). Esses sistemas são considerados de alta performance e podem ser alcançados usando codificação de sinais, detecção direta e módulo adicional de amplificação. Um exemplo disso é o esquema SDT-R referenciado por Bolognini *et al.* (2007), ilustrado na Figura 12. Os autores implementaram um sistema SDT-R com base em OTDR codificado (255 bits), com laser diodo de baixa potência (80 mW), e amplificação Raman discreta para gerar pulsos codificados de alta potência. Nesse sistema, o laser diodo operando à 1550 nm foi modulado em amplitude para gerar pulsos codificados no padrão *Simplex*, com largura de pulso de 100 ns de bit único. Os pulsos gerados foram amplificados por um amplificador Raman discreto (LRA - lumped Raman amplification), e injetados por um circulador na fibra sensora de 62,8 Km. O link sensor era composto por cinco carretéis de fibra monomodo padrão, dos quais dois foram inseridos em câmaras de temperatura controladas. Através do circulador, o sinal retroespalhado foi acoplado a um filtro passa-banda de banda larga com duas portas para selecionar as bandas de interesse que, nesse caso, correspondem as luz retroespalhada Raman anti-Stokes (1420-1520 nm) e Rayleigh (1520-1510). Cada porta conectava-se ao receptor. Os autores mostram que a combinação de OTDR-codificado e LRA possibilitou o aumento de 10 Km na distância de detecção em relação ao mesmo sistema empregando apenas OTDR-Codificado (Figura 13) . Além disso, no caso em que é utilizado OTDR convencional, é demonstrado teoricamente que para uma resolução de 5K, a faixa de sensibilidade máxima alcançada é de 15 Km.

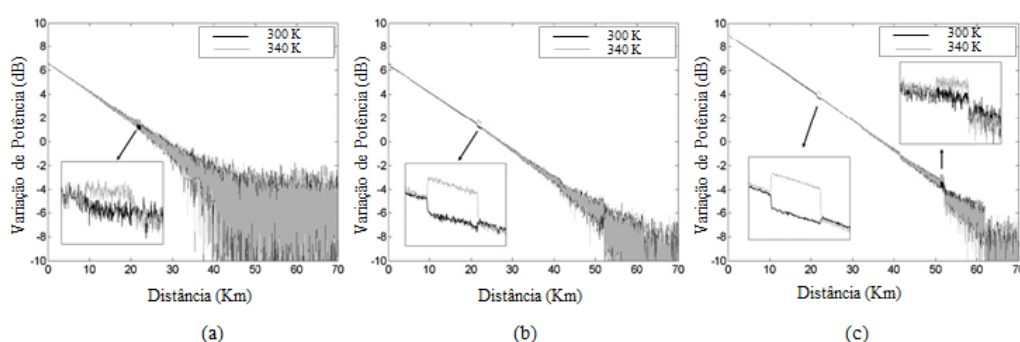
Na literatura, a combinação de técnicas de detecção distribuída de temperatura têm sido relatadas (UKIL; BRAENDLE; KRIPPNER, 2012). Alguns trabalhos relevantes propõem a utilização de espalhamento espontâneo Raman e Brillouin combinado para medidas de temperatura (ALAHBABI; CHO; NEWSON, 2005b; BROWN; BROWN; COLPITTS, 2006; BOLOGNINI; SOTO, 2010). Também são encontrados artigos que evidenciam o uso de OTDR

Figura 12 – Esquemática do arranjo experimental proposto por Bolognini et al. (2007) para detecção distribuída de temperatura baseado em espalhamento Raman usando pulsos codificados e amplificação Raman discreta. (BOLOGNINI et al., 2007).



Fonte: adaptado de Bolognini et al., (2007).

Figura 13 – Resultados obtidos por Bolognini e colaboradores (2007): traços da intensidade da luz anti-Stokes recebida obtidos usando (a) OTDR convencional, (b) OTDR codificado (codificação *Simplex* de 255 bits) e (c) OTDR codificado e amplificação Raman discreta (BOLOGNINI et al., 2007).



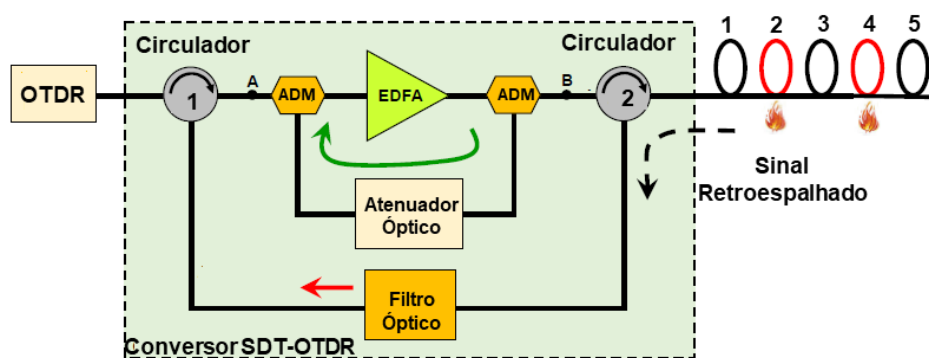
Fonte: adaptado de Bolognini et al., (2007).

comerciais ou OTDR codificado em sistemas SDT-R que permitem arranjos experimentais compactos e eficientes operando à distâncias de até 30 Km (BASSAN et al., 2015; BASSAN et al., 2016; PARK et al., 2006; SOTO et al., 2011a).

Recentemente (2016), Bassan e colaboradores apresentaram, pela primeira vez, um sensor de temperatura baseado em espalhamento Raman usando OTDR comercial e EDFA padrão de ganho controlado (BASSAN et al., 2016). No esquema proposto, um EDFA de ganho controlado amplifica os pulsos emitidos pelo OTDR para gerar sinal restroespalhado Raman anti-Stokes. O controle de ganho foi implementado a fim de minimizar as distorções na forma de onda causadas pelos efeitos transientes da amplificação à fibra dopada de Érbio. A configuração experimental implementada está esquematizada na Figura 14. O OTDR foi usado para emitir

pulsos de 100 ns. O sinal de retorno é filtrado para evitar a emissão amplificada estimulada (ASE-amplified stimulated emission) e enviado de volta para o OTDR, que detecta o Raman anti-Stokes retroespalhado. No link sensor, foram utilizados cinco carretéis de fibras ópticas monomodo, que somam 32 Km aproximadamente. A técnica de controle de ganho do EDFA consiste em um circuito e requer a utilização de dois dispositivos ópticos para inserir e retirar canais, e um atenuador óptico. O desempenho do sensor foi avaliada para três modelos diferentes de OTDR para a mesma configuração. Os autores mostraram que a resolução de temperatura e a sensibilidade do sistema podem variar consideravelmente para cada um dos OTDR. Isso pode ser visto a partir do pico da intensidade anti-Stokes em regiões de aquecimento. O melhor resultado foi obtido usando o OTDR com maior faixa dinâmica de operação (ver Figura 15). Com essa técnica, foram alcançados 10 m de resolução espacial e 16,5 dB de faixa dinâmica (BASSAN et al., 2016). Esse trabalho mostra a viabilidade de implementação de sistemas de detecção distribuída de temperatura usando equipamentos OTDRs disponíveis comercialmente e o seu potencial para medições.

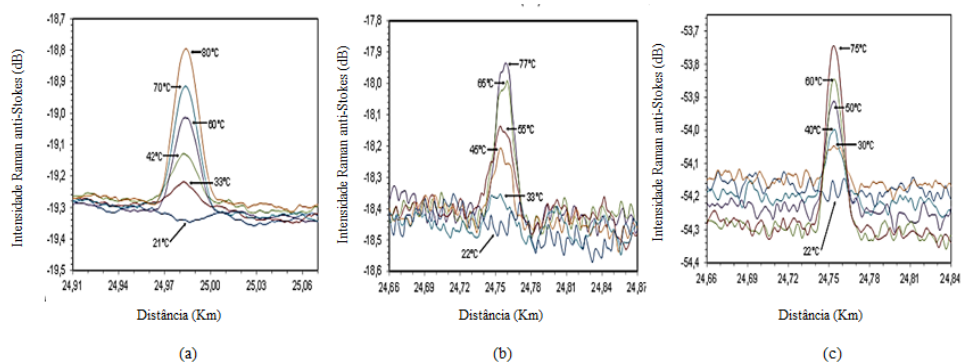
Figura 14 – Esquematização do arranjo experimental proposto por Bassan et al. (2016) para detecção distribuída de temperatura baseado em espalhamento Raman usando OTDR comercial e EDFA com ganho controlado (BASSAN et al., 2016).



Fonte: adaptado de Bassan et al., (2016).

Nos últimos anos, a tendência dos design SDT-R têm sido aprimorar essa técnica (LINK; VIJAYKRISHNAN, 2006; UKIL; BRAENDLE; KRIPPNER, 2012). Embora, essa técnica já esteja bem estabelecida e sistemas de alta performance já tenha sido apresentados, ainda existem algumas limitações (BRIGGS et al., 2012; BAO; CHEN, 2012). Nesse sentido, busca-se aumentar a precisão na coordenada espacial e na medida de temperatura para o alcance de longas distâncias (DYER et al., 2010). Além disso, há grande dedicação e interesse no desenvolvimento de SDT-R eficientes para atuação em ambientes severos, como atmosferas explosivas e usinas de energia nuclear (FERNANDEZ et al., 2005; SOTO et al., 2011b; INAUDI; GLISIC, 2006; MOHAMAD et al., 2007). Por fim, algumas publicações têm relatado a combinação entre sensores para aplicações específicas, tal como integração de sensores de temperatura e tensão

Figura 15 – Curvas OTDR para o segundo ponto de aquecimento (carretel 4): (a) OTDR I com faixa dinâmica de operação de 50 dB, resolução espacial/perdas de 0,8 m /0,001 dB; (b) OTDR II com faixa dinâmica de operação de 36 dB, resolução espacial/perdas de 0,1 m /0,001 dB; (c) OTDR III com faixa dinâmica de operação de 35 dB, resolução espacial/perdas de 0,01 m /0,08 dB; (BASSAN et al., 2016).



Fonte: adaptado de Bassan et al., (2016).

(ALAHBABI; CHO; NEWSON, 2005a; THÉVENAZ et al., 2001; INAUDI; GLISIC, 2005). O desenvolvimento de sensores capazes de medir combinações de grandezas é uma linha de pesquisa promissora.

4 DESENVOLVIMENTO DO SENSOR DE TEMPERATURA DISTRIBUÍDO BASEADO EM ESPALHAMENTO RAMAN

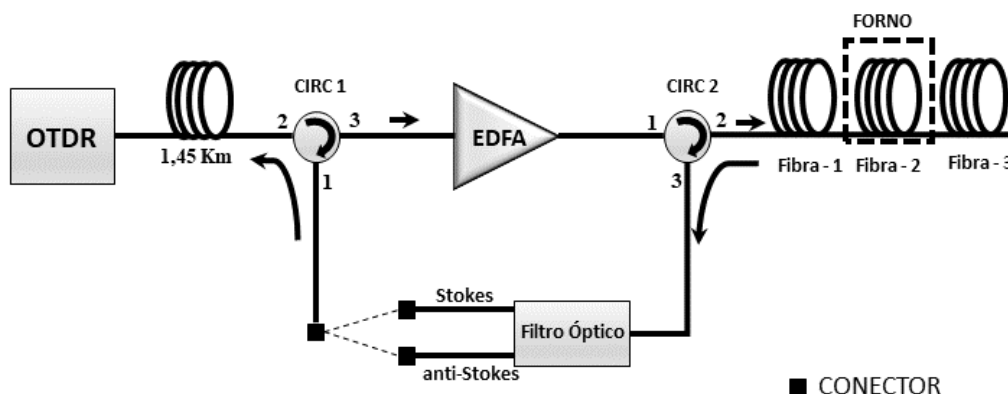
Neste Capítulo, é detalhada a configuração experimental utilizada no desenvolvimento do sensor de temperatura distribuído baseado em espalhamento Raman utilizando OTDR (reflectômetro óptico no domínio do tempo) comercial e amplificação à fibra dopada com Érbio (EDFA) padrão. Além disso, são apresentados e discutidos os resultados experimentais desse sistema. Uma análise da sensibilidade do sensor em função da largura do pulso de bombeio é apresentada para diferentes regiões do enlace óptico sensor. Na Seção 4.1, o aparato experimental é descrito. Na Seção 4.2, os componentes utilizados na concepção do sensor proposto são caracterizados. Por fim, na Seção 4.3 a obtenção dos dados é relatada, como também os resultados experimentais obtidos, e a análise desses resultados.

4.1 Configuração Experimental do Sensor de Temperatura proposto

A concepção do sensor de temperatura proposto deu-se a partir da possibilidade de se utilizar um dispositivo de interrogação espacial de fibras ópticas, com padrões comerciais, para emitir pulsos de curta duração com potência de pico estável, e detectar sinais de baixa potência em uma faixa de banda larga. Além disso, o OTDR comercial confere certa praticidade na implementação do sistema SDT-R, pois é um instrumento compacto, de simples manuseio e fácil acesso. Desse modo, a ideia central para o desenvolvimento do sensor de temperatura distribuído relatado nesta seção, consiste em utilizar um OTDR comercial como emissor e detector, e um EDFA padrão para aumentar a potência óptica dos pulsos transmitidos ao longo da fibra de detecção, melhorando a SNR do sinal Raman anti-Stokes retroespalhado. É importante destacar que o sensor aqui apresentado foi desenvolvido a partir do espalhamento Raman espontâneo. A Figura 16 ilustra a configuração experimental usada para implementar o sensor de temperatura distribuído baseado em Espalhamento Raman usando OTDR comercial e EDFA padrão.

No sistema da Figura 16, o OTDR operando à 1550 nm emite pulsos de luz periódicos com largura temporal pré-definida. Esses pulsos são amplificados por EDFA e injetados no link sensor através de um circulador óptico. Os pulsos OTDR amplificados, ao se propagarem pela fibra óptica sensora, estimulam a ocorrência do espalhamento Raman espontâneo. Um carretel de fibra monomodo padrão com comprimento de 1,45 Km foi inserido no início do sistema para evitar a região de zona morta do OTDR no enlace de detecção. Dois circuladores ópticos de três portas (CIRC 1, CIRC 2) compõem um circuito de envio e retorno. Os circuladores direcionam a propagação de luz e funcionam como isolares no sentido contrário de propagação, ou seja transmitem o sinal de 1 para 2 e de 2 para 3, e atenuam significativamente o sinal ($\sim 30dB$) de 2 para 1 e de 3 para 2 (ver Figura 16). Desse modo, os circuladores bloqueiam sinais refletidos entre CIRC1 e CIRC2 e direcionam o sinal retroespalhado gerado na fibra sob teste de volta para o OTDR após passar pelo filtro óptico, que separa o sinal Stokes e Anti-Stokes

Figura 16 – Arranjo experimental utilizado para implementar o SDT-R usando OTDR comercial e EDFA padrão .



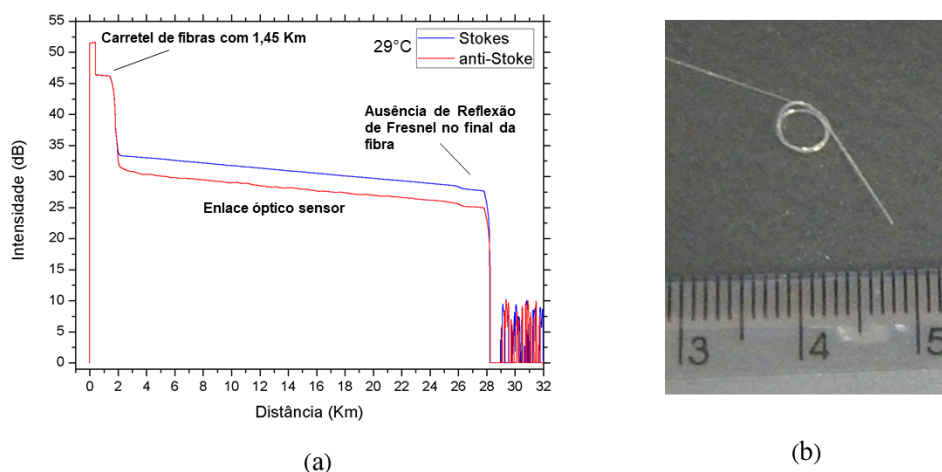
Fonte: próprio autor.

para serem medidos. As curvas-OTDR dos sinais detectados pós-filtragem foram armazenadas para processamentos posteriores. O *link* de fibra óptica sensora foi composto por três carretéis de fibra monomodo padrão (Fibra-1, Fibra-2 e Fibra-3). O carretel Fibra-2 foi inserido em um forno de temperatura de aquecimento controlada (FORNO) e ótimo isolamento térmico. O valor do comprimento dos carretéis Fibra-1, Fibra-2, Fibra-3 foram variados ao longo das medições e compõem um enlace óptico mínimo de 27 Km. Os componentes do sensor implementado serão individualmente caracterizados na Seção 4.2.

A partir dessa montagem experimental foi possível detectar os sinais retroespalhados Raman anti-Stokes e Stokes. A Figura 17 - (a) mostra as curvas OTDR relativas ao Stokes e anti-Stokes na condição de temperatura ambiente ($29^{\circ}C$). Pode-se observar na Figura 17-(a) a caracterização de todo o enlace óptico. São destacadas as regiões referentes ao comprimento de fibra adicionado no começo do sistema para evitar a zona morta no enlace sensor, e o final da fibra com ausência de reflexão de Fresnel. Esse último, deve-se ao fato da existência de curvatura acentuada (com diâmetro inferior a 1 cm) no final da fibra adicionada propositalmente ao sistema, ou seja, foi feito um pequeno nó no final da fibra (ver Figura 17 - b). Como o interesse principal dos experimentos é medir a intensidade dos sinais retroespalhados que carregam a informação de temperatura do ambiente, buscou-se evitar as reflexões dos sinais transmitidos no final da fibra, que podem contribuir para a saturação do detector do OTDR. Também é possível observar na Figura 17-(a), a diferença típica de intensidade da luz retroespalhada no link sensor, sendo o ramo Stokes tipicamente mais intenso que ramo anti-Stokes. Essas curvas foram obtidas para potência de saída do EDFA de 18 dBm.

A largura temporal do pulso-OTDR emitido, e as características do receptor determinam

Figura 17 – (a) Curva OTDR dos sinais retroespalhados Raman Stokes e anti-Stokes; (b) curvatura acentuada adicionada propositalmente ao final da fibra para evitar reflexão do sinal no final da fibra .



Fonte: próprio autor.

a resolução espacial do sensor. Além disso, o alcance do sensor é estabelecido pela combinação entre a largura do pulso emitido e o ganho do amplificador.

O sensor de temperatura distribuído implementado conforme a Figura 16, foi testado para pulsos OTDR de largura diferentes com o objetivo de promover uma análise da sensibilidade do sensor como função do largura do pulso emitido. Para isso, foram utilizados pulsos com larguras temporais entre 100 ns e 4000 ns. O intervalo de análise foi determinado conforme a disponibilidade de largura do pulso do equipamento OTDR utilizado para o comprimento do enlace óptico de teste (ver Seção 4.2.1). As disponibilidade de larguras de pulso podem variar de OTDR para OTDR. Não foram encontrados trabalhos sobre sistemas SDT-R com abordagem semelhante no que se refere a análise da sensibilidade partir da largura temporal de pulsos OTDR. É relevante destacar que, embora a maioria dos SDT-R tenham configurações semelhantes, o sensor aqui apresentada possui estrutura simplificada, quando comparada a outros SDT-R e faz uso de recursos padrões, como o OTDR e o EDFA utilizado, e técnicas de medição simples e rápida. A Tabela 1 organiza as informações de largura temporal dos pulsos de bombeio e o comprimento do link sensor empregado em alguns esquemas SDT-R relatados na literatura.

4.2 Componentes utilizados na concepção de sensor distribuído

O desenvolvimento do sensor distribuído de temperatura proposto, esquematizado na Figura 16, pode ser sintetizado em quatro módulos funcionais: (i) OTDR, que integra as etapas de emissão, detecção e interrogação espacial da fibra sob teste e fornece as informações necessárias para determinar o perfil de temperatura do sistema; (ii) amplificador, que torna os pulsos emitidos

Tabela 1 – Largura temporal do pulso (Δt) de bombeio em sistemas SDT-R e comprimento (L) do enlace óptico sensor empregado por diversos autores.

Referência	Δt (ns)	L (Km)
Dakin et al., (1985a)	15	1,6
Hartog et al.,(1985)	40	1,1
Park et al., (2006)	100	50
Bolognini et al., (2007)	100	62,8
Signorini et al., (2010)	10	39,5
Soto et al., (2011)	10	26
Ribeiro, (2011)	200	10
Hwang et al., (2010)	50	4,5
Bassan et al., (2015)	100	32,4
Bassan et al., (2016)	100	31

pelo OTDR mais intensos para gerar espelhamento Raman, permitindo um sinal restroespalhado Raman anti-Stokes melhorado; (iii) o enlace de fibra óptica sensor, meio material no qual ocorre o espalhamento Raman, que atua como elemento transdutor para medições de temperatura do ambiente externo; (iv) filtro óptico, responsável por separar os sinais Stokes e anti-Stokes e enviá-lo de volta para detecção no OTDR. Uma vez caracterizados esses módulos, pode-se dizer que o sensor implementado é completamente descrito. Os detalhe desses elementos são apresentados nas Seções 4.2.1 - 4.2.4.

4.2.1 Especificações do OTDR utilizado

O equipamento OTDR utilizado na implementação do sensor de temperatura é um modelo comercial da marca Anritsu, Modelo MT9083C2 ACCESS Master. Esse equipamento dispõem de dois lasers operando nos comprimentos de onda de 1310 nm e 1550 nm, com potência óptica máxima de 0,15W para ambos os casos. Possui uma largura de pulso que varia de 3 ns a 20 μs .

O equipamento OTDR permite selecionar diversas larguras de pulsos de acordo com a faixa de distância estabelecida na configuração da medição. Esse último parâmetro indica o comprimento máximo da fibra sob teste alcançado, e pode ser selecionado pelo operador de acordo com opções disponíveis no equipamento. A extensão da faixa de operação do OTDR determina as larguras dos pulsos adequadas para medição. Para o sistema de detecção proposto, apresentado na Figura 16, a largura temporal do pulso de incidência foi definido tomando o limite superior e inferior da largura dos pulsos disponíveis no OTDR para determinada faixa de distância, que são de 100 ns e 4000 ns para caracterizar até 50 Km de fibra óptica monomodo. Ou seja, para monitorar variações de temperatura ao longo do enlace óptico sensor de 27 Km foram utilizados pulsos OTDR de 100 ns e 4000 ns. Em algumas situações, foi realizada uma análise do sistema proposto para pulsos de larguras intermediárias: 1000 e 2000 ns.

A resolução espacial do OTDR (Δz) pode ser relaciona à largura temporal do pulso

emitido (τ_{LP}) através da Equação (14)

$$\Delta z = \frac{v_g \tau_{LP}}{2}, \quad (14)$$

em que v_g denota a velocidade de grupo, determinada pela razão entre a velocidade da luz no vácuo e o índice de refração de grupo na fibra de sílica (ROSSETTO et al., 2004). Desse modo, para as diferentes larguras de pulso do OTDR, 100 ns e 4000 ns, as resoluções espaciais do OTDR são 10,2 e 408,16 m, respectivamente. A resolução espacial também determina a zona morta do OTDR. Em resumo, a Tabela 2 apresenta algumas das especificações do OTDR utilizado no desenvolvimento do SDT-R.

Tabela 2 – Especificações do OTDR Anritsu MT9083C2

Itens	Especificação (ns)
Faixa Dinâmica	(1.32/1.55 μ) : 45/45dB@20 μ s, 25/25dB@100ns
Zona morta (luz retroespalhada)	1.31 μ s \leq 6.0m, 1.55 μ s < 6.5m
Zona morta (Reflexão de Fresnel)	\leq 1.0m
Comprimento de onda	1310/1550 \pm 25nm
Largura de Pulso	3/10/20/50/100/500ns 1/2/4/10/20 μ s
Potência óptica máxima de saída	0, 15W
Precisão na medida de perdas	\leq 2dB
Faixa de distância	0, 5/1/2, 5/5/10/25/50/100/200/300Km

Tanto o emissor quanto o detector do OTDR comercial possuem recursos interessantes para utilização em sistemas de detecção distribuídas. O receptor do OTDR permite detectar potências ópticas tão baixas quanto a potência correspondente do sinal retroespalhando Raman anti-Stokes e promove alto ganho do sinal detectado, preservando forma de onda (BASSAN et al., 2016). Ademais, o receptor tem alta largura de banda, permitindo a detecção de sinais numa faixa de banda larga. Esse recurso permite detectar as bandas stoke e anti-Stokes do retroespalhamento Raman. A detecção individual dessas componentes requer o uso de filtros ópticos adequados (ver Sessão 4.2.4) O equipamento OTDR também oferece vantagens práticas, pois permite selecionar uma gama de parâmetros, o que possibilita avaliar o sensor perante diversos aspectos, tais como largura de pulso de bombeio, alcance, número adequado de médias e outros.

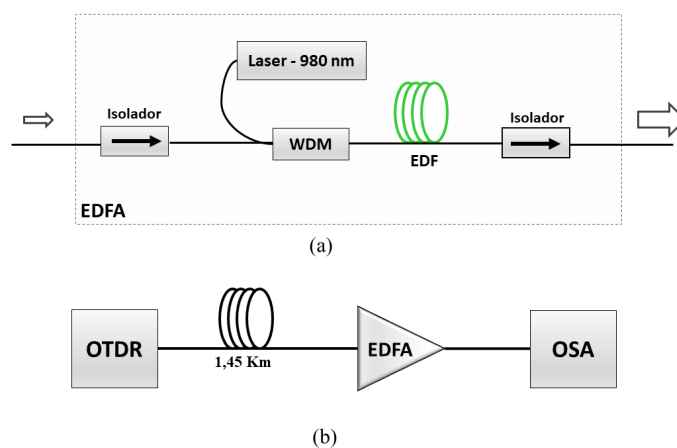
Um ponto importante no desenvolvimento do sensor foi a necessidade de promover uma isolamento adequadas da bandas Stokes e anti-Stokes em conformidade com o protocolo do OTDR para verificar fibras ativas. Isso deve-se ao fato de que, ao iniciar uma medição, antes de emitir pulsos ópticos, o OTDR verifica a fibra sob teste para identificar se há transmissão de sinal na fibra com potência óptica maiores que \sim - 40 dBm no comprimento de onda de 1550 nm. Em caso positivo, o OTDR emite um alerta e não permite efetuar medições. Por esse motivo, o filtro utilizado deve propiciar uma supressão adequada em torno de 1550 nm.

4.2.2 Caracterização do amplificador EDFA

A maior limitação dos sensores de temperatura distribuídos baseados em espalhamento Raman está relacionada a baixa potência do sinal retroespalhado anti-Stokes (BASSAN et al., 2015). Esse problema pode ser minimizado introduzindo um módulo de amplificação para aumentar a potência óptica do sinal transmitido para gerar espalhamento Raman e, conseqüentemente, melhorar a detecção e a relação sinal-ruído do anti-Stokes. Para isso, o amplificador deve estar alocado imediatamente após o laser.

A utilização de amplificação do tipo EDFA nos sistemas de detecção distribuída é considerada vantajosa, pois apresenta menor tamanho, custo e consumo de potência, quando comparada a outros amplificadores. Para aplicações em sensores distribuídos de temperatura, o EDFA tem como característica principal a alta potência de saída que promove o aumento do alcance do sensor. Por esse motivo, optou-se por usar um EDFA padrão para amplificar os pulsos emitidos por um equipamento OTDR, conforme esquematizado na Figura 18. A configuração experimental do EDFA desenvolvido para amplificar pulsos OTDR é apresentada na Figura 18-(a).

Figura 18 – (a) Configuração do amplificador óptico tipo EDFA padrão utilizado no SDT-R proposto, (b) diagrama da montagem utilizada para analisar o ganho do EDFA.



Fonte: próprio autor.

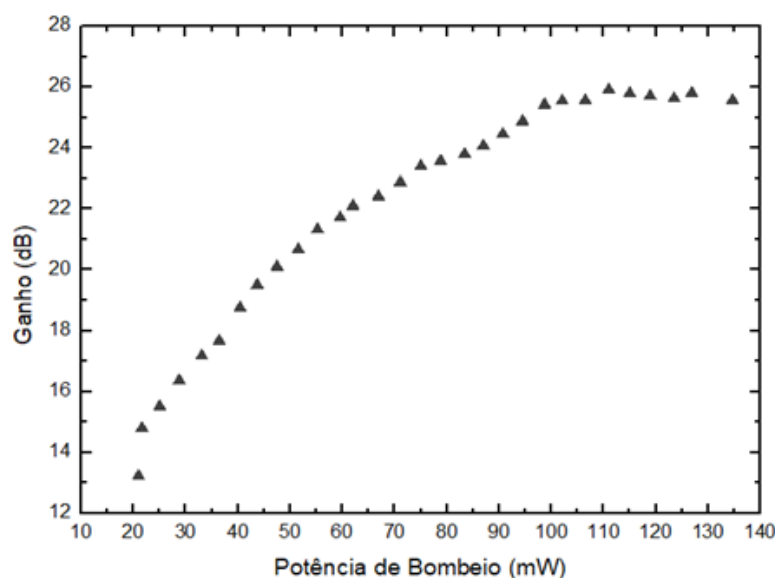
Para a implementação do EDFA esquematizado na Figura 18, foi utilizado um dispositivo WDM 980/1550 nm que permite combinar o sinal do laser de bombeio em 980 nm e um sinal de 1550 nm em uma fibra dopada com érbio (EDF - Erbium Doped Fiber) do tipo *M-3(1480/125)* com 10 m de comprimento. Optou-se por utilizar um laser de bombeio com comprimento de onda de 980 nm para evitar interferências na faixa espectral dos sinais Raman anti-Stokes e Stokes. Também foram utilizados dois isoladores com perda de inserção máxima de 1 dB para minimizar possíveis sinais de retorno propagando-se em sentido à fonte de luz. A topologia utilizada nesse amplificador foi do tipo bombeio co-propagante. Essa escolha foi feita a fim de

evitar transmissão de sinal em sentido ao OTDR que possam ocasionar a saturação do detector.

A caracterização do amplificador foi feita a partir da medida do ganho EDFA em função da potência de bombeio usando OTDR como fonte de luz. A Figura 18-(b) esquematiza a configuração experimental utilizada para medir o ganho EDFA do sinal emitido pelo OTDR operando em modo *Fonte de Luz*. Nesse modo, o OTDR pode emitir um sinal de onda contínua (CW - *Continuous Wave*) com comprimento de onda centrado em 1550 nm. A medida do ganho no EDFA é obtida pela diferença (em dB) da potência do sinal na saída e a potência do sinal na entrada do amplificador. Para o bombeio, foi utilizado um laser em 980 nm com potência máxima de 300 mW. Os valores das potências de saída para diferentes potências de bombeio foram determinados por meio de um analisador de espectro óptico (OSA - optical spectrum analyzer). A potência óptica do sinal do OTDR medida na entrada do amplificador em 1550 nm foi de -04,77 dBm. A análise do espectro do sinal de saída se faz necessária pois na saída também está presente a emissão espontânea amplificada (ASE). Assim, para determinar a potência do sinal de saída, é necessário subtrair as contribuições de potência referente a ASE da potência total de saída.

A Figura 19 mostra o ganho do EDFA, como função da potência de bombeio. É possível perceber o aumento do ganho à medida que a potência de bombeio também aumenta, atingindo um valor máximo de aproximadamente 26 dB.

Figura 19 – Ganho EDFA em função da potência de bombeio.



Fonte: próprio autor.

No sensor de temperatura proposto, o EDFA foi configurado para viabilizar 18 dBm de

potência de saída. A potência de saída foi determinada a partir da isolação promovida pelos filtros ópticos utilizados no experimento. É importante destacar que após a saída do amplificador o sinal ainda sofre atenuações, de modo que a potência do sinal na entrada da fibra sensora não corresponde a potência de saída do EDFA.

4.2.3 Descrição do enlace óptico fibra sensora

Dentre as muitas características que tornam os sensores distribuídos de temperatura à fibra óptica interessantes, pode-se destacar a possibilidade de monitorar as variações de temperatura em estruturas com vários quilômetros de extensão, uma vez que o elemento de detecção é a própria fibra. Assim, o projeto de desenvolvimento do sensor deve levar em conta essa característica.

No sensor proposto buscou-se testar os limites de operação sob diversas perspectivas. Para isso foram utilizados 3 carretéis de fibra emendados por fusão, que somam o comprimento mínimo de 27 Km. Os carretéis foram dispostos conforme esquematizado na Figura 16. O carretel Fibra-2 foi inserido em um forno mufla (SPLabor/Modelo SP-1200) que permitia programar a temperatura de aquecimento por meio de um controlador digital externo. Os demais carretéis foram mantidos a temperatura ambiente. O forno utilizado possui termostato na cavidade interna que permite monitorar a temperatura interna através de um *display*. A Figura 20 exibe uma fotografia do arranjo de medição do enlace sensor, do forno e do OTDR utilizado para obtenção das curvas de temperatura.

Figura 20 – Fotografia de alguns componentes utilizado para obtenção das curvas de temperatura

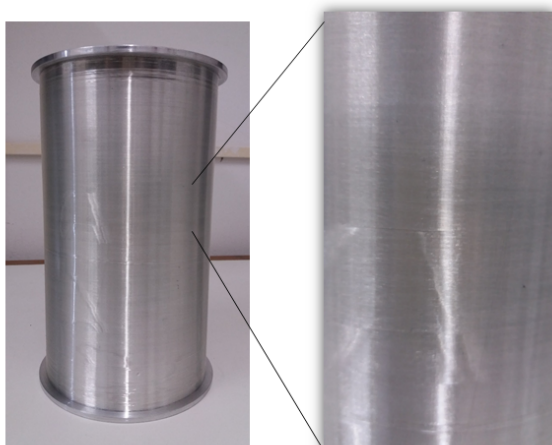


Fonte: próprio autor.

Para submeter uma região do link sensor à variações de temperatura entre $30^{\circ}C$ e $100^{\circ}C$, foi utilizado um carretel de alumínio, no qual foram enrolados 627 m de fibras, para inserir uma região do link sensor no forno para aquecimento. O carretel de alumínio foi projetado para

introduzir o maior comprimento de fibra possível no forno. Suas dimensões foram determinadas levando em conta o tamanho da cavidade de aquecimento do forno e a dilatação térmica do material para a variação de temperatura na qual o sensor foi testado. A fibra para aquecimento foi enrolada no carretel de modo a minimizar as tensões impostas à fibra devido a dilatação térmica do carretel e, conseqüentemente, evitar a ruptura da fibra. Os coeficientes de dilatação linear do alumínio e da sílica fundida são $\alpha_{Al} = 23,6 \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ e $\alpha_{SiO_2} = 0,4 \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$, respectivamente. Foram enroladas duas camadas de fibras sem sobreposição adicionais, sem emendas e com o menor espaçamento longitudinal possível, ou seja, em uma única camada ao longo da altura carretel, sem espaço entre as voltas, e de modo que nenhum comprimento de fibra se sobrepõem a outro. Essas medidas foram adotada para garantir que essa extensão do enlace fosse aquecida uniformemente. A Figura 21 apresenta uma fotografia do carretel de alumínio com 627 m de fibra.

Figura 21 – Fotografia do carretel de alumínio utilizado para inserir 627 m de fibra no forno para aquecimento .



Fonte: próprio autor.

Para implementação do enlace sensor foram utilizadas fibras monomodo de fabricantes diferentes, cujos coeficientes de atenuação em 1550 nm são aproximadamente $\alpha \approx 0,19 \text{ dB/Km}$. Os três carretéis utilizados tinham comprimentos de 24,6398 Km, 0,6269 Km e 1,8897 Km. A ordem de disposição desses carretéis foi alterada ao longo das medições. Para facilitar as discussões futuras, sua localização no link sensor será denotada por Fibra-1, Fibra-2 e Fibra-3. Onde a Fibra-2 foi sempre o carretel submetido a variações de temperatura.

O uso de fibras monomodo em sensores distribuídos de temperatura baseado no espalhamento Raman espontâneo impõe a necessidade de limitar a potência na entrada da fibra ao valor limiar de ocorrência do espalhamento Raman estimulado para preservar a medida de temperatura (RIBEIRO, 2011). Apesar de limitar o valor da potência de entrada, o uso desse tipo de fibra nos SDT-R se mostra interessante pois as fibras monomodo apresentam baixa perda

de potência óptica, e são compatíveis com a maioria dos dispositivos ópticos comercialmente disponíveis.

4.2.4 Filtro óptico

Como abordado no Capítulo 02, no espalhamento Raman em fibras ópticas de sílica, o comprimento de onda referente às ondas anti-Stokes e Stokes diferem cerca de 100 nm do comprimento de onda da luz gerada no espalhamento. Assim, para uma fonte de luz operando a 1550 nm, como gerado pelo OTDR usado no experimento, o comprimento de onda dos sinais anti-Stokes e Stokes devem ser em 1450 nm e 1650 nm, respectivamente. Além disso, o espectro das bandas geradas no espalhamento Raman é largo. Desse modo, para selecionar adequadamente os sinais restroespalhados Raman anti-Stokes e Stokes é necessário utilizar filtros ópticos apropriados. É de fundamental importância que os filtros empregados promovam uma separação adequada do sinal de interesse e sejam compatíveis com o sistema de fibras ópticas nas faixas de potências de operação do sensor. Como a intensidade do sinal anti-Stokes restroespalhado é tipicamente baixa, é necessário que o filtro referente a esse ramo seja capaz de separar o sinal com baixa perda. Além disso, os filtros devem ser ajustados ao aparato experimental, tal que permitam a detecção simultânea das bandas Stokes e anti-Stokes. Para o sensor proposto, o filtro ainda deve ser capaz de atenuar ao menos 30 dB a faixa de 1525-1575 nm para evitar saturação do detector (OTDR) com luz proveniente da emissão espontânea amplificada do EDFA.

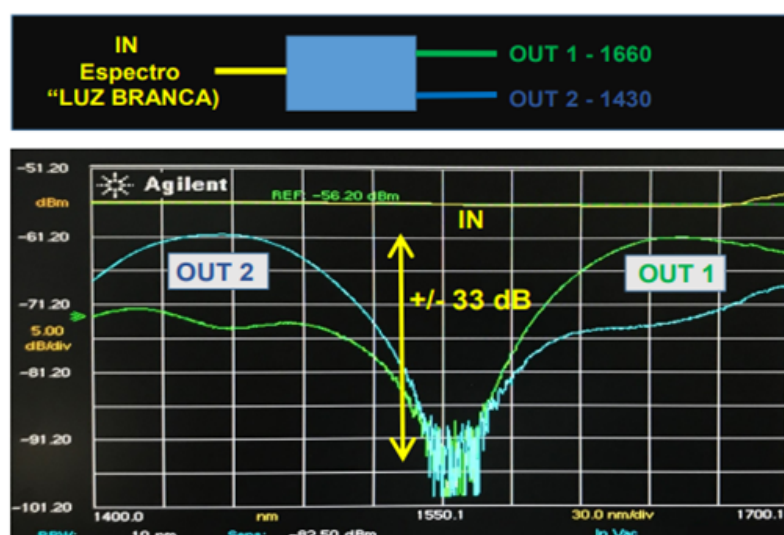
No aparato experimental esquematizado na Figura 16, foram utilizados filtros ópticos passa-banda para selecionar os sinais restroespalhados Raman anti-Stokes (1400-1480 nm) e Stokes (1610-1700 nm), e para evitar as interferências da emissão espontânea amplificada (ASE - amplified spontaneous emission). O filtro referido foi confeccionado pela *Optolink LDTA*® para atender as especificações do projeto, e possui uma porta de entrada (1550 nm) e duas portas de saídas referentes as bandas Stokes (1660 nm) e anti-Stokes (1450 nm). A Figura 22 mostra o filtro utilizado e a caracterização do espectro de saída nas portas de 1660 nm (*OUT 1*) e 1450 nm (*OUT 2*) por meio de uma fonte de banda larga ("luz branca- *in*"). A partir da Figura 22-(b) é possível observar que o filtro promove uma atenuação de 33 dB na faixa de 1520-1580 nm e aproximadamente 3,5 dB em 1450 nm e 1660nm.

Como a potência óptica do sinal anti-Stokes é tipicamente baixa, foi necessário adicionar um filtro WDM (1550nm/1450 nm) em série para eliminar as contribuições da ASE restantes e melhorar a detecção do sinal. A perda de inserção máxima do WDM utilizado é de 1,0 dB. A Figura 23 mostra o diagrama de blocos da composição do filtro óptico utilizado para separar as bandas anti-Stokes (1450 nm) e Stokes (1650 nm).

Figura 22 – (a) filtro óptico customizado da *OptoLink* com duas portas de saída referentes as bandas anti-Stokes (*OUT 1450 nm*) e Stokes (*OUT 1660 nm*); (b) espectro de saída do filtro.



(a)



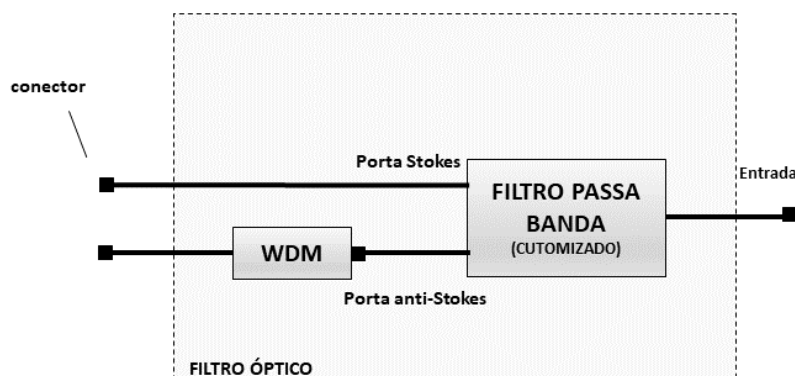
(b)

Fonte: *OptoLink LTDA*©.

4.3 Medições de temperatura

As medições de temperatura foram feitas submetendo o carretel Fibra-2 a aquecimento controlado no intervalo de 30 à 100°C. Essas temperaturas foram monitoradas através de um *display* contido no forno que informa a temperatura interna medida por um termostato. Para obter a distribuição espacial de temperatura medida pelo sensor, pulsos-OTDR amplificados por EDFA foram enviados e transmitidos pelo link sensor. Os sinais retroespalhados Raman anti-Stokes e Stokes foram detectados pelo equipamento OTDR, que fornece a curva da intensidade em função da distância de ambos os sinais para diferentes temperaturas. Nos experimentos, cada

Figura 23 – Diagrama de bloco do filtro óptico utilizado na implementação do SDR-R proposto. A caixa do filtro é composto por uma filtro passa banda de banda larga com uma porta de entrada e duas portas de saídas, porta Stokes (1650) e porta anti-Stokes(1450 nm). Em adição a porta anti-Stokes foi inserido um filtro WDM (1450/1550) .



Fonte: *próprio autor.*

porta do filtro foi conectada ao OTDR de modo que media-se a intensidade do sinal Stokes, e imediatamente depois media-se a intensidade referente ao anti-Stokes.

As curvas OTDR foram obtidas em duas etapas. Primeiro a medida foi feita com todo o enlace sensor à temperatura ambiente. Em seguida, o forno foi programado para aquecer a Fibra-2 até 100°C. Quando a temperatura programada foi atingida, o forno foi desligado e a medição foi efetuada conforme o sistema aquecido era naturalmente resfriado. Esse método de medição foi adotado levando em conta baixa taxa de resfriamento do sistema devido ao isolamento térmico proporcionado pela estrutura do forno, de modo que a região aquecida fosse submetida a uma temperatura aproximadamente constante durante o tempo de medição. Além disso, esse método fornece o tempo necessário para estabilizar a amplitude do sinal a determinada temperatura.

O sensor implementado conforme a Figura 16, foi avaliado para duas larguras de pulsos e duas regiões de aquecimento: (i) pulsos de 100 ns e Fibra-2 disposta na posição correspondente a 3,4 Km do enlace; (ii) pulsos de 100 ns e Fibra-2 alocada no quilômetro 25,4 Km; (iii) pulsos de 4000 ns e Fibra-2 na posição 3,4 Km; e (iv) com pulsos de 4000 ns com a Fibra-2 posicionada em 25,4 Km. Esse arranjo permite testar o funcionamento do sensor para curtas e longas distâncias. Além disso, duas medidas adicionais foram feitas usando pulsos de 1000 e 2000 ns para a Fibra-2 situada na posição de 25,4 Km.

Devido a baixa intensidade do sinal anti-Stokes, a curva OTDR referente a esse sinal tende a ser muito ruidosa. Por esse motivo o OTDR foi configurado para efetuar 7,5 minutos de média a fim de otimizar a qualidade do sinal. Além disso, o valor médio das curvas minimiza a influência de flutuações na obtenção do valor de temperatura. O isolamento térmico do forno

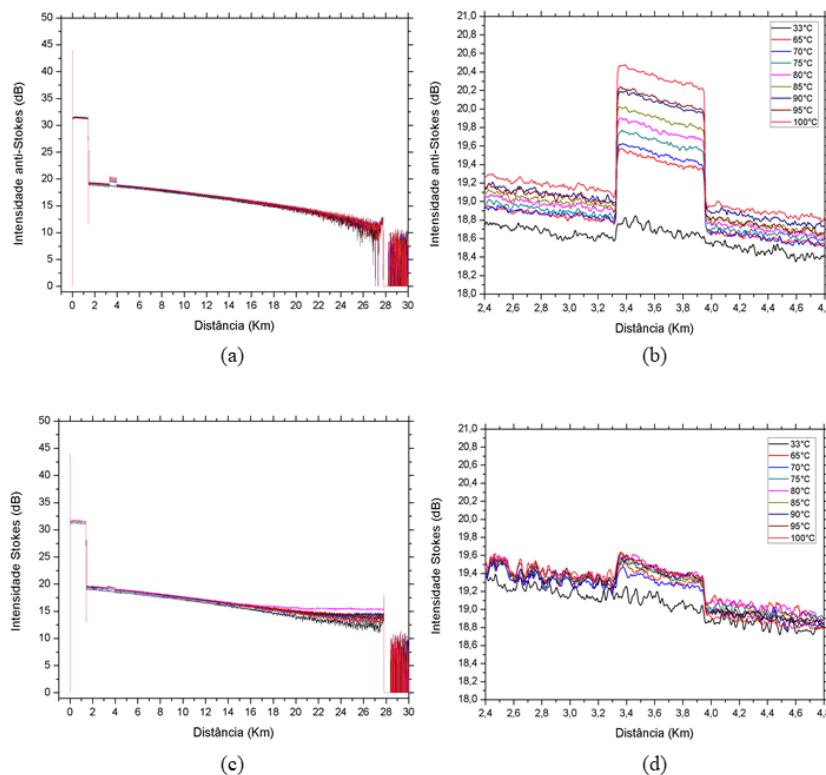
utilizado também propicia boa estabilidade da temperatura nesse intervalo de tempo. Assim, as variações de temperatura no intervalo de 7,5 minutos são inferiores a 2°C e temperatura medida corresponde a temperatura média. O tempo de média foi estabelecido com base em testes preliminares, levando em conta a taxa de resfriamento da região aquecida e o tempo de aquisição de dados. Usando a configuração apresentada na Figura 16 as curvas OTDR dos sinais retroespalhados Raman Stokes e anti-Stokes foram obtidas para diferentes valores de temperatura ajustados no forno, sempre dentro do intervalo de 30°C a 100°C . Cada curva OTDR foi adquirida com densidade de 25001 pontos de intensidade para os sinais retroespalhados anti-Stokes e Stokes.

A Figura 24 exibe a curva OTDR dos sinais anti-Stokes e Stokes obtida para pulsos de 100 ns e região de aquecimento na posição 3,4 Km. Nota-se, a partir da Figura 24-(a-b), o aumento da intensidade do sinal anti-Stokes com o aumento da temperatura na região referente a Fibra-2, ou seja na porção aquecida do enlace. Enquanto a intensidade nas regiões à temperatura ambiente é praticamente invariante. Esses resultados mostram que o sensor proposto permite identificar com clareza a extensão da fibra sensora submetida a variações de temperatura. Pois a intensidade do sinal anti-Stokes traduz adequadamente o aumento da temperatura em uma determinada região, sendo possível verificar a mudança do nível anti-Stokes para variações de 5°C em ordem de crescimento. Por outro lado, a intensidade do sinal Stokes manteve-se aproximadamente constante em toda a extensão do enlace (Figura 24-(c)-(d)). Essas constatações estão de acordo com o perfil característicos das componentes do espalhamento Raman, no qual o sinal anti-Stokes é fortemente sensível a temperatura, enquanto o Stokes não é. É importante destacar que tanto o espalhamento anti-Stokes quanto espalhamento Stokes são dependentes da temperatura. No entanto, a sensibilidade do Stokes a variações de temperatura é muito pequena. (SINGH; GANGWAR; SINGH, 2007)

Também é possível verificar a degradação dos sinais à medida que o comprimento da fibra aumenta. Esse problema limita o alcance do sensor e pode ser melhorado aumentando a potência do sinal de entrada (BOLOGNINI et al., 2006). Outro aspecto importante observado na Figura 24 é a atenuação diferencial dos sinais.

As curvas OTDR dos sinais retroespalhados Raman anti-Stokes e Stokes fornecem a base de dados para determinar o perfil de temperatura do sistema. Após a obtenção dos dados via OTDR é iniciada a etapa de processamento de dados, na qual são feitas as correções de perdas do sinal e posteriormente o cálculo da temperatura como função da distância no link sensor. Um fator importante a ser considerado nessa etapa são as pequenas variações de intensidade dos sinais em regiões mantidas a temperatura ambiente. Essas flutuações são derivadas de efeitos degradantes aos sinais e podem ser minimizadas através de técnicas de normalização. Durante a realização do experimento, verificou-se que as trocas de conectores ao longo das medições contribuíam fortemente para o aumento das flutuações do sinal. Como mencionado anteriormente, as medições dos sinais anti-Stokes e Stokes foram realizadas conectando uma das portas de saída do filtro óptico ao OTDR por vez, ou seja, para obter a curva OTDR anti-Stokes conectava-se a porta de

Figura 24 – Curvas da intensidade em função da distância de propagação e picos de intensidades dos sinais retroespalhados Raman anti-Stokes (a e b) e Stokes (c e d) para diferentes temperatura obtidas via OTDR .



Fonte: próprio autor.

saída do filtro referente a essa banda, enquanto a porta do filtro designada ao Stokes permanecia desconectada; quando a curva anti-Stokes era obtida, o processo análogo era realizado para a curva Stokes. Esse processo pode comprometer significativamente o resultado final, pois insere perdas diferentes aos sinais para todas as temperaturas. Além disso, ocasionalmente podem ocorrer encaixes indevidos e possíveis degradações do conector ao longo das medições. A fim de minimizar essas perdas, foi utilizado um método correção referenciado, que consiste em subtrair das curvas obtidas um valor de intensidade de referência em um ponto no começo do enlace mantido a temperatura ambiente. A Figura 25-(b) mostra os picos de intensidades anti-Stokes referentes ao aumento da temperatura no forno aplicando o método de correção referenciado às curvas da Figura 25-(a). O fator de correção empregado utilizou como referência a intensidade do sinal na posição de 2,80009 Km do link sensor. A aplicação desse método não só permitiu o melhoramento das flutuações do sinal à temperatura ambiente, como também tornou o espaçamento dos picos de intensidade mais uniforme. Ainda na Figura 25-(b) é possível constatar que a variação da intensidade do sinal anti-Stokes para a variação de 10°C é de aproximadamente 0,20 dB no ponto central da região de aquecimento. Na literatura é possível encontrar resultados

que mostram uma variação de aproximadamente 0,12 dB para o aumento da temperatura em 10°C SDT-R usando OTDR comercial (ver Seção 3.5) (BASSAN et al., 2016)). A partir disso, é possível concluir que a sensibilidade do sensor proposto está em conformidade com valores relatados na literatura para os sensores distribuídos de temperatura baseados em espalhamento Raman usando OTDR comercial e amplificação do tipo EDFA.

Na literatura são relatados diferentes métodos para determinar o perfil de temperatura em sistemas de detecção distribuídas baseados em espalhamento Raman, dos quais podem-se destacar dois métodos.

O primeiro método é o mais preciso e também mais difícil de ser aplicado, pois requer que os coeficientes de atenuação dos sinais anti-Stokes e Stokes sejam determinados pontualmente ao longo de toda a extensão da fibra (SOTO et al., 2007a). Nesse método, a temperatura ponto a ponto é determinada através da Equação 13, no qual a razão entre a intensidade anti-Stokes e Stokes fornece o valor temperatura absoluta. A Equação 10 também pode ser utilizada para o caso em que a atenuação diferencial é corrigida.

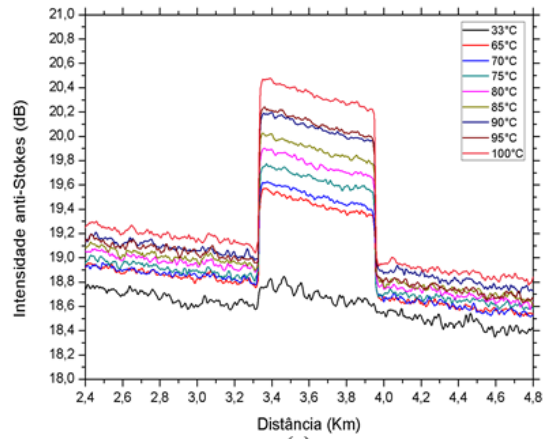
O segundo método usa curvas de referência à temperatura ambiente, e curvas de calibração a uma temperatura controlada para traçar o perfil de temperatura do sistema. Consiste basicamente em determinar a relação entre razão das intensidade anti-Stokes e Stokes e a temperatura. Para isso uma calibração do sistema é feita medindo-se a intensidade anti-Stokes e Stokes para temperaturas conhecidas. Esse método requer normalizar as curvas obtidas a partir do sistema aquecido pela curva medida mantendo o enlace a temperatura ambiente. Essa normalização elimina os efeitos causados pela perda diferencial. O perfil de temperatura também pode ser traçado utilizando somente a curva do sinal anti-Stokes normalizada, já que esse é o sinal do qual as informação de temperatura são extraídas. Por simplicidade, optou-se por determinar a distribuição espacial de temperatura através desse método.

Para fazer a calibração do sensor proposto, foram obtidas as curvas OTDR da intensidade Stokes e anti-Stokes para temperaturas conhecidas utilizando o esquema experimental da Figura 16. O monitoramento do aquecimento foi feito através da temperatura indicada no forno, aferida pelo termostato situado dentro da cavidade do forno. A partir do processamento dos dados coletados foi possível determinar a curva que relaciona a razão das intensidades e a temperatura, assim como a expressão que traduz a intensidade anti-Stokes em informação de temperatura em todos os pontos ao longo do enlace.

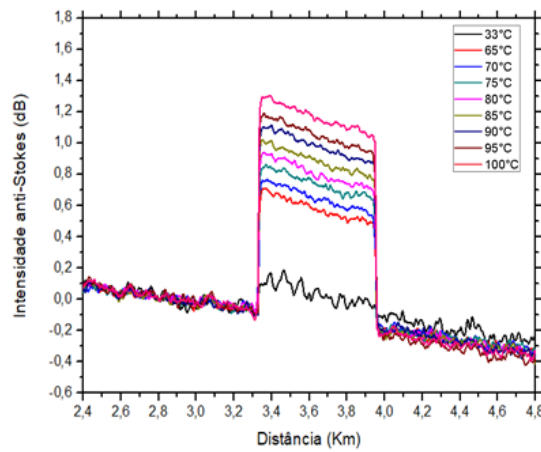
Embora esse método permita determinar o perfil de temperatura medindo somente as intensidade anti-Stokes, é necessário fazer um normalização da curva para corrigir os efeitos da atenuação do sinal ao longo da distância de propagação na fibra. Quando esses efeitos não são corrigidos a informação de temperatura é distorcida, pois regiões mais atenuadas são relacionadas à temperaturas mais baixas e pontos que sofreram menos atenuação são associados a altas temperaturas.

A normalização das curvas obtidas por OTDR é de fundamental importância pois além de corrigir efeitos degradantes decorrentes de selecionar dois sinais de comprimento de onda

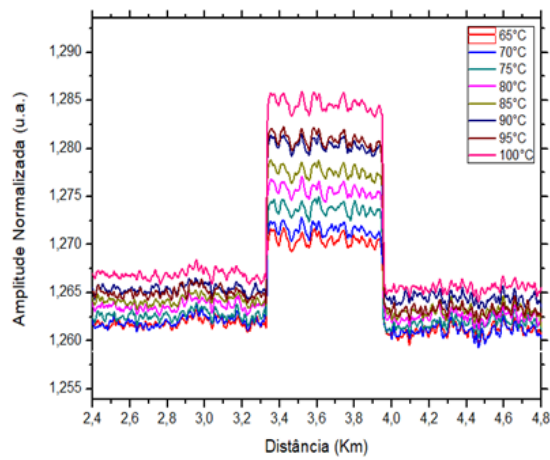
Figura 25 – Picos de intensidade do sinal restroespalhado Raman anti-Stokes referentes ao aumento de temperatura (a) sem processamento de dados, (b) aplicando o método de correção referenciado, (c) utilizando o método de normalização .



(a)



(b)



(c)

Fonte: próprio autor.

diferentes, tal como o anti-Stokes e Stokes, que sofrem perda de potência óptica diferenciadas ao longo das distâncias de propagação, a normalização minimiza efeitos de variações de intensidade do sinal na região de temperatura ambiente. Em tese todos os sinais medidos para as mesmas condições deveriam apresentar o mesmo nível. O método utilizado para a normalização consiste em calcular a razão entre intensidade anti-Stokes (e Stokes) para diferentes temperaturas e a curva da intensidade do mesmo sinal obtida a uma temperatura de referência T_{ref} para todos os pontos ao longo do enlace sensor da seguinte forma

$$I_N = \frac{I_{AS}(T)}{I_{AS}(T_{ref})}. \quad (15)$$

Na normalização das curvas obtidas experimentalmente a temperatura de referência utilizada foi sempre a menor temperatura para qual as curvas OTDR Stokes e anti-Stokes foram obtidas.

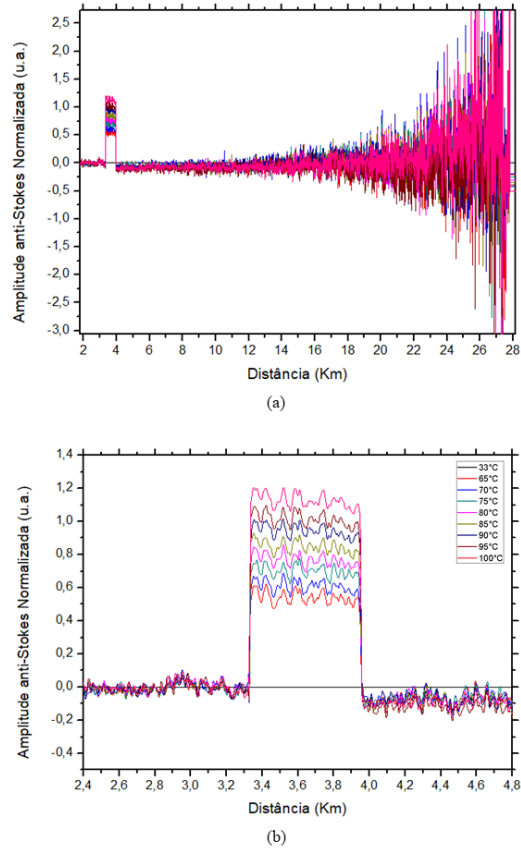
Ao longo do processamento de dados foi constatado que a apenas a utilização do método de normalização por um curva a uma temperatura de referência não eliminava as flutuações no nível anti-Stokes nas regiões mantidas a temperatura ambiente, como pode ser constatado através da Figura 25-(c). Desse modo, foi proposto a utilização combinada dos métodos de correção referenciada e normalização por uma curva de referência. Os resultados obtidos são apresentados na Figura 26. Nota-se que a aplicação desses métodos minimizou as flutuações na região de temperatura ambiente, na qual a intensidade do sinal anti-Stokes se manteve aproximadamente constante. Essa característica também é observada na região de aquecimento (Figura 26-(b)). O perfil ruidoso do sinal para distâncias mais longas observado na Figura 26-(a) está relacionado a baixa SNR do sinal anti-Stokes e delimita o alcance do sensor. De modo que variações de temperatura no final do link são mais difíceis de serem identificadas e requerem um melhor desempenho do detector. A faixa de operação do sensor pode ser estendida aumentando a potência óptica do sinal de entrada na fibra sensora. No entanto, esse valor de potência está limitado pelo limiar para geração do espalhamento Raman estimulado.

Para determinar a distribuição de temperatura uma calibração do sensor foi feita a partir da intensidade anti-Stokes para diversos valores de temperatura conhecidas, os resultados estão apresentados nas Figuras 27 e 28. A inclinação da reta de calibração define a sensibilidade do sensor, e o percentual de ajuste designa a acurácia do sensor, de modo que um melhor valor de ajuste implica em menor diferença entre a temperatura medida pelo sensor e a temperatura medida pelo termostato. Essa diferença, para o arranjo proposto, foi de aproximadamente 2°C.

A partir da Figura 28 é possível inferir que o alcance do sensor é limitado por uma extensão de aproximadamente 15 Km. A partir dessa distância, o perfil de temperatura é muito ruidoso e possivelmente pequenas variações de temperatura não poderão ser identificadas nessa região.

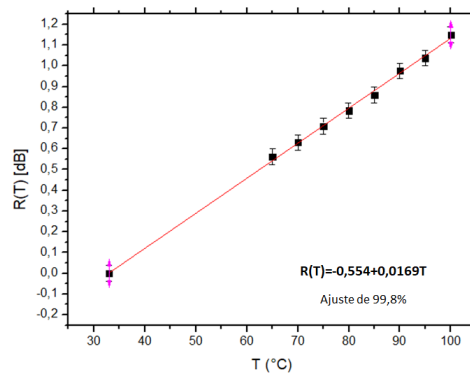
Um procedimento análogo foi feito para determinar a temperatura a partir da Razão entre as intensidades dos sinais retroespalhados Stokes e anti-Stokes medidas pelo OTDR. Assim, a razão entre as intensidades dos sinais medidos para diferentes temperaturas gera um conjunto de pontos que determinam a curva de calibração do sensor. A intensidade do sinal Stokes, medida

Figura 26 – Amplitude do sinal anti-Stokes normalizada (a) para toda a extensão do link sensor e (b) na região de aquecimento medida usando 627 m de fibra aquecida na posição 3,4 km para o pulsos - OTDR de 100 ns.



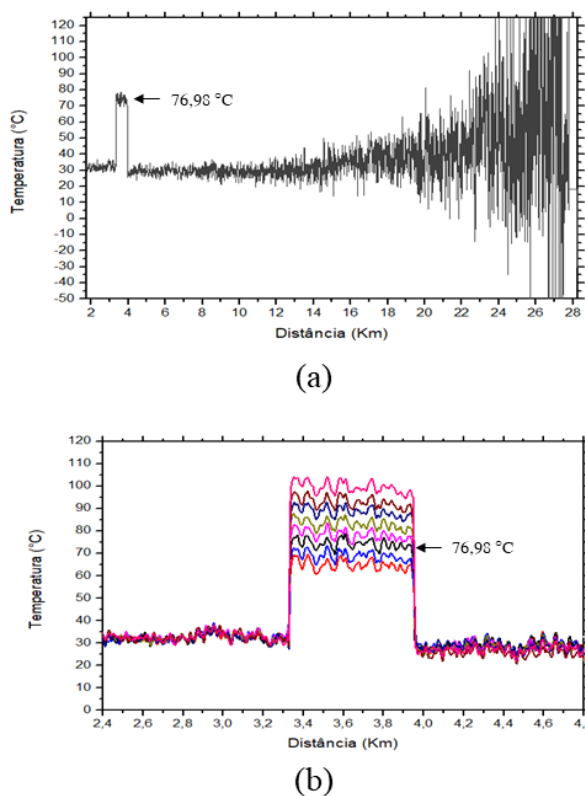
Fonte: próprio autor.

Figura 27 – Curva de calibração de temperatura a partir da intensidade das curvas anti-Stokes normalizadas pelo método que utiliza curva anti-Stokes a uma temperatura de referência e aplicação do método de correção referenciada.



Fonte: próprio autor.

Figura 28 – Distribuição de temperatura em função do comprimento da fibra (a) e picos de temperatura (b) medidos usando 627 m de fibra aquecida na posição 3,4 km para o pulsos - OTDR de 100 ns.

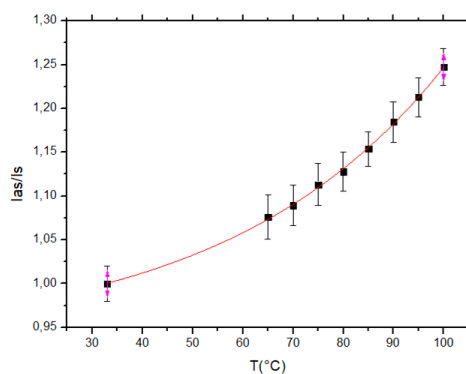


Fonte: próprio autor.

para temperaturas conhecidas, foi normalizada através dos mesmos métodos utilizados para normalizar o sinal anti-Stokes. Os resultados obtidos são apresentados nas Figuras 29 e 30. Nesse caso, o ajuste curva aos pontos medidos experimentalmente é um pouco menor que ajuste da curva que relaciona apenas a intensidade do sinal anti-Stokes a temperatura. Isso acontece porque o sinal Stokes insere ruídos à medida, como pode ser visto na Figura 30. Apesar disso, esse ajuste fornece uma calibração adequada do sensor. O desvio médio da temperatura para esse caso foi de 2,18 °C .

A sensibilidade do sensor também foi analisada usando pulsos com largura temporal de 4000 ns para variações de temperatura na posição de 3,4 Km. O experimento foi realizado sobre as mesmas circunstâncias descritas anteriormente, isto é, mantendo o ganho do amplificador EDFA, o comprimento total da fibra sensora, e protocolo de medição. Os resultados experimentais mostraram que usando a configuração apresentada na Figura 16 é possível identificar com clareza a região de aquecimento no enlace, conforme mostrado na Figura 31-(a). Quando as perdas causadas pela mudança de conexão entre as portas do filtro óptico e o OTDR são corrigidas, é possível verificar o crescimento proporcional da intensidade anti-Stokes para alteração de 5°C na

Figura 29 – Curva de calibração de temperatura a partir da razão entre as intensidade anti-Stokes e Stokes normalizadas pelo método que utiliza curva anti-Stokes e Stokes a uma temperatura de referência e aplicação do método de correção referenciada, obtida para medições usando pulsos-OTDR de 100 ns e variações de temperatura na posição de 3,4 Km do enlace.



Fonte: próprio autor.

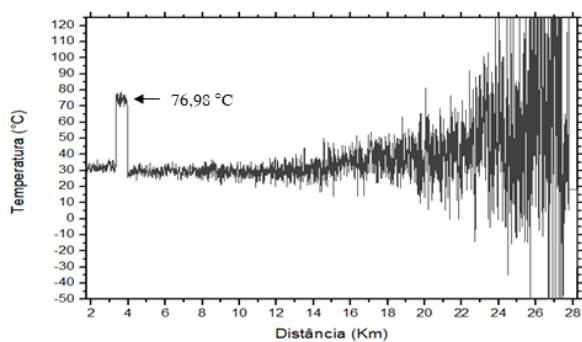
temperatura do forno. Além disso, é observada uma variação média de 0,2 dB no aquecimento do sistema em 10°C, como pode ser constatado na Figura 31-(b). Como mencionado anteriormente, a resolução espacial da OTDR depende da largura temporal do pulso emitido, sendo melhor para pulsos com larguras menores. Em consequência disso, as forma dos picos de intensidade nas Figuras 26-(b) e 31-(b) são diferentes.

Efetuada a normalização das curvas OTDR anti-Stokes medidas, foi obtida a reta que relaciona as intensidade anti-Stokes à temperatura e permite determinar o perfil de temperatura do sistema aquecido no começo do enlace, em 3,4 Km . Os resultados obtidos estão ilustrados nas Figuras 32 e 33. Uma análise do coeficiente angular das retas de calibração obtidas para pulsos de 100 ns (Figura 27) e 4000 ns (Figura 32) permite concluir que os dois modos de operação do sensor resultam em sensibilidades diferentes. Além disso, o valor de ajuste da reta aos pontos medidos experimentalmente indicam que a acurácia do sensor operando com pulsos de 4000 ns é menor quando comparada à operação em 100 ns.

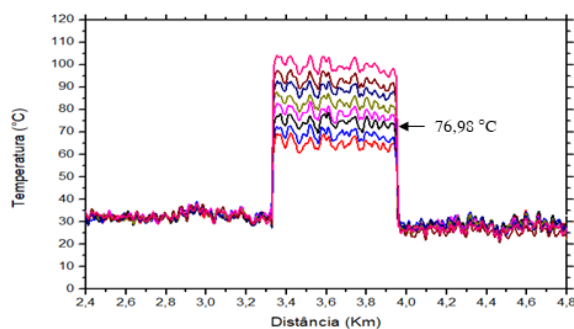
A Figura 33 exhibe os mapas de temperaturas obtidos a partir do sensor para pulsos de 4000 ns. Notam-se os picos de temperaturas na região correspondente a Fibra-2 nos pontos em que houve aquecimento. Esses resultados mostram que o valor obtido a partir do sensor difere cerca de 5°C das temperaturas obtidas por meio do termostato do forno. Uma característica interessante na distribuição de temperatura da Figura 33-(a) é o perfil ruidoso das curvas na região correspondente aos primeiros 10 quilômetros da Fibra-3 (4 - 14 Km), seguido de uma região muito menos ruidosa. Isso leva a crer que tal comportamento possa ser decorrentes de fatores degradantes localizados que parecem ter início na emenda entre a Fibra-2 e Fibra-3. No entanto nada pôde ser concluído a respeito das causas dessas particularidades.

A sensibilidade do sensor também foi obtida para uma região no final do link. Para

Figura 30 – Distribuição temperatura em função do comprimento da fibra (a) e picos de temperatura (b) obtidos a partir da calibração que relaciona a razão entre as intensidades anti-Stokes e Stokes medidas usando 627 m de fibra aquecida na posição 3,4 km para o pulsos - OTDR de 100 ns .



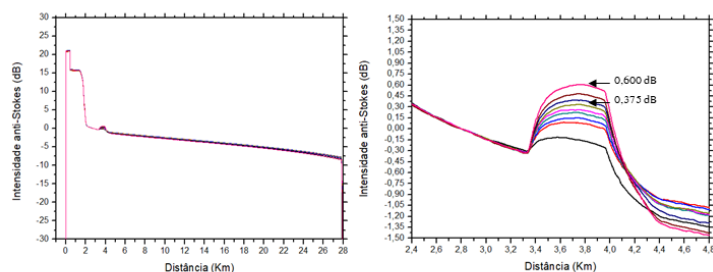
(a)



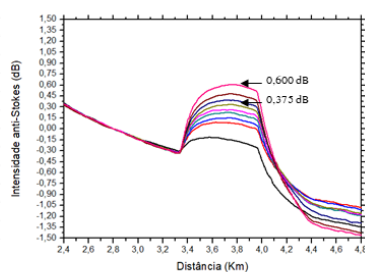
(b)

Fonte: próprio autor.

Figura 31 – Amplitude do sinal anti-Stokes normalizada (a) para toda a extensão do link sensor e (b) na região de aquecimento medida usando 627 m de fibra aquecida na posição 3,4 km para o pulsos - OTDR de 4000 ns.



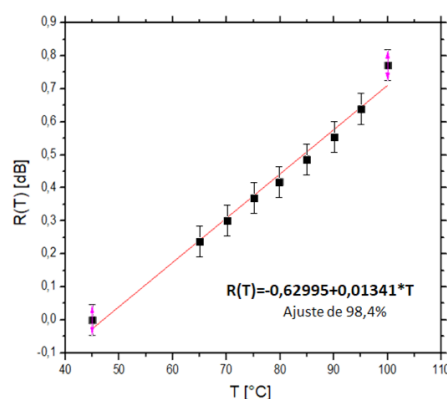
(a)



(b)

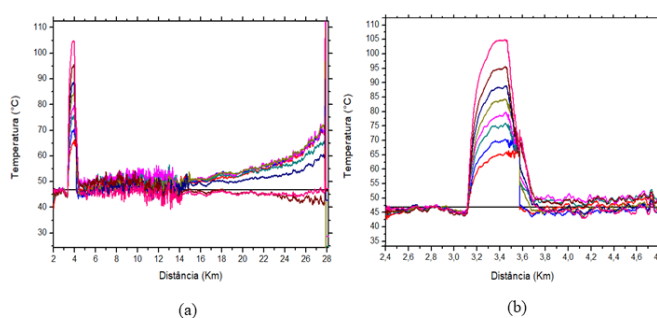
Fonte: próprio autor.

Figura 32 – Curva de calibração de temperatura a partir da intensidade anti-Stokes normalizada obtida para medições usando pulsos-OTDR com 4000 ns variações de temperatura na posição de 3,4 Km do enlace.



Fonte: próprio autor.

Figura 33 – Distribuição de temperatura em função da distância (a) e picos de temperatura (b) medida usando 627 m de fibra aquecida na posição de 3,4 Km para pulsos - OTDR de 4000 ns.



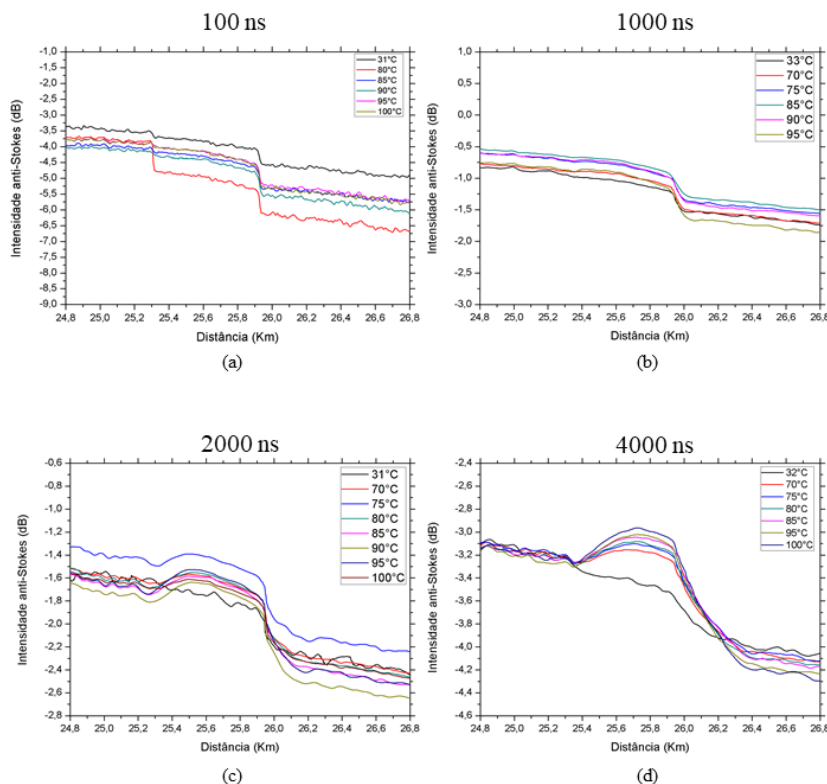
Fonte: próprio autor.

isso, a disposição dos carretéis de fibra que compõem o link sensor foram alterados a fim de manter o carretel de alumínio sempre dentro do forno, ou seja na posição de Fibra-2. Nesse sentido, o carretel com 24,6 Km foi alocado na posição da Fibra-1 e o carretel com 1,88 Km foi direcionado para a posição da Fibra-3. Usando o mesmo protocolo de medição, a intensidade do sinal retroespalhado Raman anti-Stokes foi medida para quatro larguras de pulsos diferentes. O objetivo inicial de utilizar diversas larguras de pulsos foi verificar se é possível detectar variações de intensidade do sinal retroespalhado anti-Stokes, provenientes de uma região aquecida no final do link, aumentando a largura de pulso e, conseqüentemente, aumentando a intensidade dos pulsos enviados mantendo o ganho do EDFA.

A análise da sensibilidade do sensor para variações de temperatura na posição 25,4 Km foi feita para os pulsos de 100, 1000, 2000 e 4000 ns. O resultado dessa análise é exibida na

Figura 34, onde se tem a apresentação dos resultados experimentais das curvas de intensidade do sinal anti-Stokes ao longo da distância no enlace óptico.

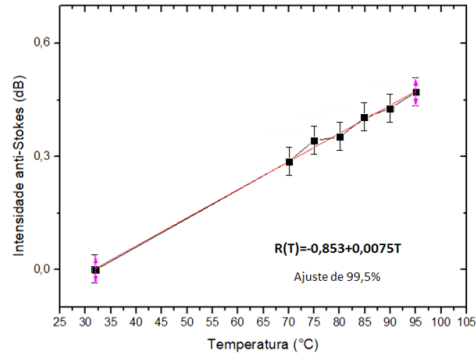
Figura 34 – Intensidade dos sinais anti-Stokes retroespalhados medidos usando 627 m de fibra aquecida na posição 25,4 km, usando pulsos-OTDR de (a) 100 ns, (b) 1000 ns, (c) 2000 ns e (d) 4000 ns.



Fonte: próprio autor.

Na situação em que o OTDR emitiu pulsos de 100 ns não foi possível identificar os picos de intensidade anti-Stokes referentes ao aquecimento da Fibra-2, conforme ilustra a Figura 34-(a). Esse resultado é coerente com as medições feitas para a região de aquecimento no começo link, a partir das quais foi constatado que o alcance do sensor é cerca de 15 Km. Um resultado análogo foi obtido quando o OTDR emitiu pulsos de 1000 ns, como pode ser visto na Figura 34-(b). O aumento de intensidade do sinal anti-Stokes na poção do enlace aquecido começou a ser detectado na situação em que o OTDR emitiu pulso de 2000 ns, como mostrado na Figura 34-(c). Embora tenha sido possível identificar mudanças na forma da curva OTDR do sinal anti-Stokes, o acréscimo da intensidade do sinal em função das variações de temperatura foi pouco observado, não sendo possível distinguir variações de 70 °C, mesmo depois da aplicação dos métodos de normalização e de correções de perdas. Por fim, as curvas OTDR do anti-Stokes foram medidas para pulsos de 4000 ns. As curvas obtidas para variações de temperatura de 32°C até 95°C, mostradas na Figura 34, permitem distinguir o aumento de temperatura em 10 °C.

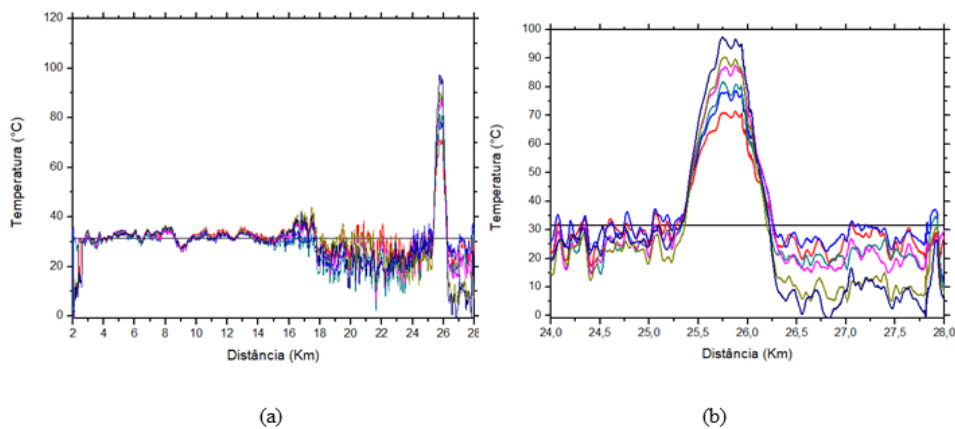
Figura 35 – Curva de calibração de temperatura a partir da intensidade anti-Stokes normalizadas obtida usando pulsos - OTDR de 4000 ns e variações de temperatura na posição de 25,4 Km do enlace.



Fonte: próprio autor.

A distribuição de temperatura do sistema para pulsos OTDR de 4000 ns foi obtida através dos processos descritos anteriormente. A reta de calibração e o perfil de temperatura são apresentados nas Figuras 35 e 36, respectivamente. A Figura 36-(a) mostra aumento de aproximadamente 12 Km na faixa de operação do sensor quando comparado aos resultados obtidos para 100 ns. Embora, a medida de temperatura tenha sido mais precisa, quando utilizados pulsos de 100 ns, a operação do sensor para essa largura de pulso torna inviável a detecção de temperatura nos quilômetros finais do enlace. Por outro lado, regiões mais remotas podem ser monitoradas utilizando pulsos de 4000 ns.

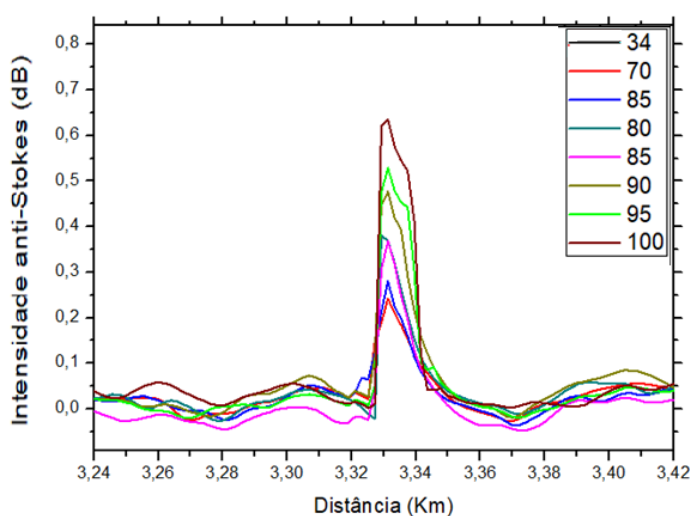
Figura 36 – Distribuição de temperatura em função da distância (a) e picos de temperatura (b) obtida usando 627 m de fibra aquecida na posição de 25,4 Km para pulsos - OTDR de 4000 ns.



Fonte: próprio autor.

O sensor também foi testado medindo variações de temperatura em 2 m de fibra na posição 3,4 Km usando a configuração experimental da Figura 16 para pulsos-OTDR de 100 ns. Para efetuar as medições, 2 m de fibra enrolada no carretel de alumínio foi inserida no forno. Na posição da Fibra-1 foi colocado o carretel com 1,88 Km, e na posição da Fibra-3 foi alocado o carretel de 24,4 Km. As curvas OTDR do sinal retroespalhado anti-stokes foram obtidas executando o mesmo protocolo de medição relatado anteriormente e os picos de intensidade decorrentes do aumento da temperatura são apresentados na Figura 37.

Figura 37 – Picos de intensidade do sinal restroespalhado Raman anti-Stokes referentes ao aumento de temperatura em 2 m na posição 3,4 Km usando pulsos-OTDR de 100 ns

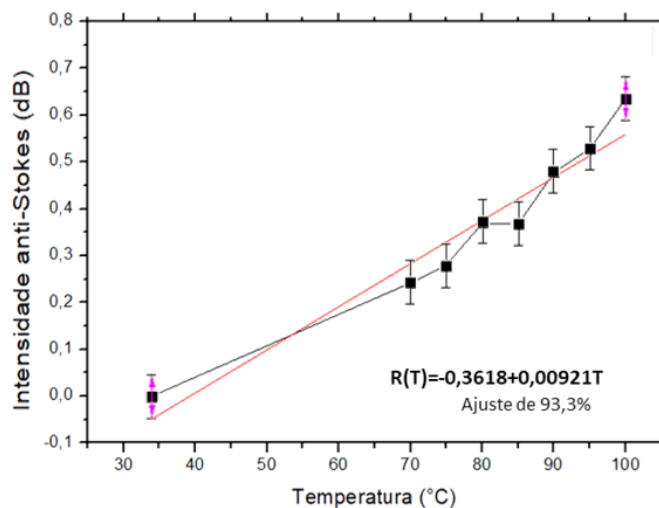


Fonte: próprio autor.

As curvas da Figura 37 mostram que o sensor é capaz de identificar variações de intensidade do sinal retroespalhado Raman anti-Stokes em extensões tão pequenas quanto 2 m para mudanças de temperatura na posição de 3,4 Km do enlace. Nesse arranjo, variações de 10°C puderam ser detectados com o aumento médio de 1,1 dB na intensidade anti-Stokes. Esse resultado é importante pois estabelece uma análise da performance do sensor desenvolvido próximo ao limite de resolução espacial do OTDR que é de 1 m. A curva de calibração do sensor para essa combinação e a distribuição espacial obtida estão ilustradas nas Figuras 38 e 39.

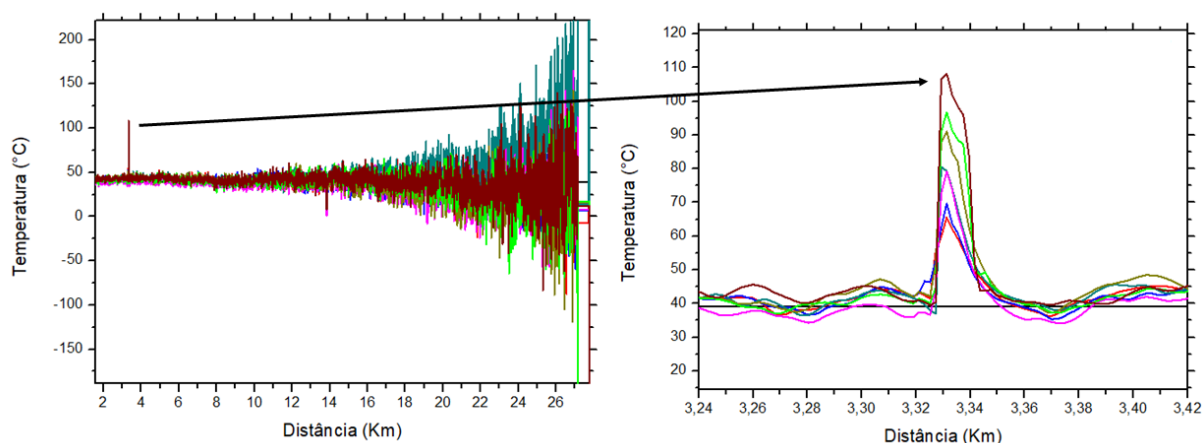
A inclinação das retas usadas para calibrar o sistema e determinar a distribuição espacial de temperatura informam sobre a sensibilidade do sensor para a combinação da largura de pulso e das regiões de detecção configuradas nos experimentos. Uma análise desses parâmetros permite concluir que a sensibilidade do sensor é maior quando o OTDR opera com menor largura de pulso para detectar alteração de temperatura nos quilômetros iniciais do enlace. Por outro lado, quando as alterações de temperatura ocorrem no final do link sensor, o uso de pulsos-OTDR mais

Figura 38 – Curva de calibração de temperatura a partir da intensidade anti-Stokes normalizadas usando pulsos-OTDR de 100 ns e variações de temperatura em 2m na posição de 3,4 Km do enlace.



Fonte: próprio autor.

Figura 39 – Distribuição temperatura em função do comprimento da fibra (a) e picos de temperatura (b) medidos usando 2 m de fibra aquecida na posição 3,4 km para pulsos - OTDR de 100 ns.



Fonte: próprio autor.

largos resulta em maior sensibilidade do sensor para essa região. O resumo desses resultados é apresentado na Tabela 3

Esses resultados mostram que a sensibilidade pode depender da largura do pulso emitido, de tal modo que para pulsos de 4000 ns é possível detectar regiões de aquecimento que não são identificadas quando pulsos de largura menores são utilizados. Esse resultado se traduz no aumento da faixa de operação do sistema, como pode ser observado a partir dos mapas de

Tabela 3 – Resumo dos Resultados

Posição da Fibra-2 (Km)	Comprimento da Fibra-2 (m)	Largura de Pulso (ns)	Sensibilidade (dB/°C)	Adequação da curva aos dados experimentais (%)	Resolução de Temperatura °C
3,4	620	100	0,0169	99,8	5
3,4	620	4000	0,0134	98,4	5
25,4	620	4000	0,0075	99,5	10
25,4	620	2000	0,0002	4,0	-
25,4	620	1000	0,0001	3,3	-
25,4	620	100	0,0001E-1	12,0	-
3,4	2	2	0,0092	93,3	10

temperatura das Figura 36 e 28. Em termos práticos, isso indica que o sensor de temperatura distribuído desenvolvido pode ser operado para pulsos com larguras diferentes: usando pulsos de 100 ns para monitorar temperatura com alcance médio de 15 Km e resolução de temperatura de 5°C; e pulsos de 4000 ns para detectar alterações com resolução de 10 °C aumentando o alcance do sensor em torno de 12 Km.

5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Esse trabalho apresentou o desenvolvimento de um sensor distribuído de temperatura à fibra óptica baseado em espalhamento Raman espontâneo. Através de um sistema que utiliza OTDR e EDFA padrão, foi possível detectar alterações de temperatura em dois pontos distintos ao longo de um enlace com extensão mínima de 27 Km.

No esquema proposto foram utilizados os recursos de um equipamento OTDR comercial para enviar pulsos de curta duração e detectar sinais retroespalhados de baixa intensidade em uma faixa de banda larga. O OTDR operando em 1550 nm foi utilizado em combinação com amplificador do tipo EDFA para enviar pulsos de alta intensidade ao longo de uma fibra óptica sensora com a finalidade de melhorar a SNR do sinal Raman anti-Stokes retroespalhado. A utilização do OTDR comercial permitiu implementar um esquema experimental bastante simplificado e de tamanho reduzido se comparado ao arranjo experimental de diversos sensores distribuídos de temperaturas baseado na técnica OTDR relatados na literatura, pois o próprio equipamento é compacto e de fácil manuseio. Além disso, o equipamento OTDR permitiu testar o sensor implementado sob diferentes perspectivas sem a necessidade de adicionar novos elementos ao arranjo experimental.

Neste trabalho, a implementação do sensor distribuído baseado em Raman foi apresentada em detalhes, onde todos os elementos que compõem o sensor foram caracterizados. Após a concepção do sensor distribuído, foi apresentado o protocolo de medição seguido das curvas de intensidade do sinal anti-Stokes obtidas pelo OTDR com as informações de temperatura e posição da região aquecida para circunstâncias diferentes. A partir da obtenção de dados, a etapa de processamento foi apresentada, na qual foram descritos os métodos empregados para a correção de perdas do sinal e a degradação da medida de temperatura quando tais correções não são aplicadas. A partir disso foram apresentados os resultados experimentais da detecção distribuída de temperatura para pulsos-OTDR com larguras diferentes e alterações de temperatura em dois pontos no enlace sensor.

No primeiro caso, o desempenho do sensor foi testado usando pulsos-OTDR de 100 ns para 627 m de fibra aquecida, na distância de 3,4 Km. Os resultados obtidos para essa formatação mostraram que a faixa de operação do sensor é de aproximadamente 15 Km, sendo possível identificar variações de 5°C na temperatura. Além disso, o sistema proposto apresentou sensibilidade semelhante às relatadas na literatura quando OTDR comercial é utilizado. Para esse caso, distribuição espacial de temperatura foi obtida através de uma calibração do sistema aquecido para temperaturas conhecidas, na qual a intensidade anti-Stokes foi diretamente relacionada à temperatura. O mapa de temperatura também foi determinado através da razão entre as intensidades dos sinais retroespalhados anti-Stokes e Stokes, usando a mesma técnica de calibração. Foi constatado que a diferença entre as temperaturas medidas com um termostato e com o sensor é maior quando é usada a razão das intensidades anti-Stokes e Stokes.

O sensor também foi testado usando pulsos-OTDR de 4000 ns para alterações de temperatura na posição de 3,4 Km. Nesse modo de operação, também foi possível identificar variações na intensidade anti-Stokes decorrentes do aumento da temperatura em 5°C. Apesar disso, os resultados mostram uma pequena diminuição da sensibilidade em relação aos resultados obtidos para pulsos de 100 ns.

Para o caso em que uma região no final do link foi submetida a variações de temperaturas, a sensibilidade do sensor foi testada usando quatro larguras de pulsos diferentes. Para essa formatação foi mostrado que a utilização de pulsos-OTDR de 4000 ns possibilita identificar variações de intensidade anti-Stokes para mudança de 10°C na temperatura. Nesse caso, o alcance do sensor é de pelo menos 27 Km. Os resultados também mostraram que não foi possível medir variações de intensidade em função do aumento da temperatura quando pulsos de 100, 1000 e 2000 ns foram utilizados.

Esses resultados mostram que o desempenho do sensor proposto é diferente quando pulsos de largura diferentes são emitidos pelo o OTDR. Quando são utilizados pulsos de 100 ns o sensor tem uma faixa de medição de aproximadamente 15 Km com resolução de 5 °C. Por outro lado, quando o OTDR emite pulsos de 4000 ns, o alcance é melhorado em cerca de 11,5 Km com resolução de 10°C. Além disso, resultados indicam que a sensibilidade do sensor em diferentes regiões de detecção pode variar com a mudança da largura do pulso emitido pelo OTDR.

Em adição, o funcionamento do sensor foi testado medindo variações de temperatura em 2 m de fibra na posição de 3.4 Km para o OTDR operando em 100 ns. Os resultados mostram que o sensor foi capaz de detectar uma variação média de 1,1 dB na intensidade do sinal anti-Stokes para o aumento da temperatura em 10 °C.

5.1 Conclusões e Perspectivas Futuras

Como continuação deste trabalho, as seguintes propostas são sugeridas:

- testar o funcionamento do sensor para mais de um ponto de aquecimento usando diferentes comprimentos de fibra aquecida e determinar os limites de detecção;
- estudar a sensibilidade do sensor a partir de diferentes larguras de pulso emitido por OTDR comercial em diversas faixas de detecção;
- avaliar o impacto do aumento do ganho do EDFA e explorar combinações entre o ganho do EDFA e a largura de pulso avaliar o desempenho do sensor.
- estudar o impacto de uso de mais de um EDFA no o alcance do sensor.
- explorar a utilização adicional de filtros para separar as bandas anti-Stokes e Stokes mais adequadamente e determinar a distribuição espacial de temperatura absoluta a partir da Equação 10 ;

- testar o desempenho do sensor para o outras faixas de temperatura, incluindo temperaturas menores que a ambiente (situações de resfriamento da fibra).
- usar fibras especiais, para altas temperaturas, para a realização de sensor distribuído para temperaturas acima de 100 graus, com avaliação da máxima temperatura alcançável

REFERÊNCIAS

- AGRAWAL, G. *Applications of nonlinear fiber optics*. [S.l.]: Academic press, 2001. Citado na página 19.
- AGRAWAL, G. P. Nonlinear fiber optics. In: *Nonlinear Science at the Dawn of the 21st Century*. [S.l.]: Springer, 2000. p. 195–211. Citado 2 vezes nas páginas 22 e 37.
- AGRAWAL, G. P. *Fiber-optic communication systems*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2012. v. 222. Citado 4 vezes nas páginas 19, 21, 24 e 28.
- ALAHBABI, M.; CHO, Y.; NEWSON, T. Simultaneous temperature and strain measurement with combined spontaneous raman and brillouin scattering. *Optics letters*, Optical Society of America, v. 30, n. 11, p. 1276–1278, 2005. Citado na página 46.
- ALAHBABI, M. N.; CHO, Y. T.; NEWSON, T. P. 150-km-range distributed temperature sensor based on coherent detection of spontaneous brillouin backscatter and in-line raman amplification. *JOSA B*, Optical Society of America, v. 22, n. 6, p. 1321–1324, 2005. Citado 2 vezes nas páginas 25 e 43.
- BAO, X.; CHEN, L. Recent progress in distributed fiber optic sensors. *Sensors*, Molecular Diversity Preservation International, v. 12, n. 7, p. 8601–8639, 2012. Citado 4 vezes nas páginas 17, 24, 25 e 45.
- BARNOSKI, M.; JENSEN, S. Fiber waveguides: a novel technique for investigating attenuation characteristics. *Applied optics*, Optical Society of America, v. 15, n. 9, p. 2112–2115, 1976. Citado na página 33.
- BARONTI, F. et al. Snr enhancement of raman-based long-range distributed temperature sensors using cyclic simplex codes. *Electronics letters*, IET, v. 46, n. 17, p. 1221–1223, 2010. Citado na página 43.
- BASSAN, F. et al. Raman-based distributed temperature sensor using simplex code and gain controlled edfa. In: INTERNATIONAL SOCIETY FOR OPTICS AND PHOTONICS. *24th International Conference on Optical Fibre Sensors*. [S.l.], 2015. v. 9634, p. 96346P. Citado 6 vezes nas páginas 16, 37, 39, 40, 44 e 52.
- BASSAN, F. R. et al. Distributed temperature sensing system using a commercial otdr and a standard edfa with controlled gain. In: INTERNATIONAL SOCIETY FOR OPTICS AND PHOTONICS. *Fiber Optic Sensors and Applications XIII*. [S.l.], 2016. v. 9852, p. 98520S. Citado 9 vezes nas páginas 10, 11, 16, 40, 44, 45, 46, 51 e 61.
- BAZZO, J. P. et al. Improving spatial resolution of raman dts using total variation deconvolution. *IEEE Sensors Journal*, IEEE, v. 16, n. 11, p. 4425–4430, 2016. Citado na página 20.
- BOLOGNINI, G.; HARTOG, A. Raman-based fibre sensors: Trends and applications. *Optical Fiber Technology*, Elsevier, v. 19, n. 6, p. 678–688, 2013. Citado 12 vezes nas páginas 10, 16, 17, 20, 30, 31, 33, 34, 35, 37, 38 e 40.
- BOLOGNINI, G. et al. Performance enhancement of raman-based distributed temperature sensors using simplex codes. In: IEEE. *Optical Fiber Communication Conference, 2006 and the*

2006 National Fiber Optic Engineers Conference. *OFC 2006*. [S.l.], 2006. p. 3–pp. Citado 2 vezes nas páginas 43 e 59.

BOLOGNINI, G. et al. Analysis of distributed temperature sensing based on raman scattering using otdr coding and discrete raman amplification. *Measurement Science and Technology*, IOP Publishing, v. 18, n. 10, p. 3211, 2007. Citado 6 vezes nas páginas 10, 38, 40, 42, 43 e 44.

BOLOGNINI, G.; SOTO, M. A. Optical pulse coding in hybrid distributed sensing based on raman and brillouin scattering employing fabry–perot lasers. *Optics Express*, Optical Society of America, v. 18, n. 8, p. 8459–8465, 2010. Citado na página 43.

BOYD, R. W. *Nonlinear optics*. 3. ed. [S.l.: s.n.], 2007. Citado 3 vezes nas páginas 23, 24 e 37.

BRIGGS, M. A. et al. Using high-resolution distributed temperature sensing to quantify spatial and temporal variability in vertical hyporheic flux. *Water Resources Research*, Wiley Online Library, v. 48, n. 2, 2012. Citado na página 45.

BROWN, K. A.; BROWN, A. W.; COLPITTS, B. G. Combined raman and brillouin scattering sensor for simultaneous high-resolution measurement of temperature and strain. In: INTERNATIONAL SOCIETY FOR OPTICS AND PHOTONICS. *Smart Structures and Materials 2006: Smart Sensor Monitoring Systems and Applications*. [S.l.], 2006. v. 6167, p. 616716. Citado na página 43.

CHAMPAVERE, A. New otdr measurement and monitoring techniques. In: OPTICAL SOCIETY OF AMERICA. *Optical Fiber Communication Conference*. [S.l.], 2014. p. W3D–1. Citado na página 17.

CULSHAW, B. Optical systems and sensors for measurement and control. *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, IOP Publishing, v. 16, n. 10, p. 978, 1983. Citado na página 28.

CULSHAW, B. Fiber optics in sensing and measurement. *IEEE Journal of selected topics in quantum electronics*, IEEE, v. 6, n. 6, p. 1014–1021, 2000. Citado 2 vezes nas páginas 28 e 29.

DAKIN, J. et al. Distributed antistokes ratio thermometry. In: OPTICAL SOCIETY OF AMERICA. *Optical Fiber Sensors*. [S.l.], 1985. p. PDS3. Citado 2 vezes nas páginas 10 e 41.

DAKIN, J. et al. Distributed antistokes ratio thermometry. In: OPTICAL SOCIETY OF AMERICA. *Optical Fiber Sensors*. [S.l.], 1985a. p. PDS3. Citado na página 41.

DAKIN, J. P. Distributed optical fiber sensors. In: INTERNATIONAL SOCIETY FOR OPTICS AND PHOTONICS. *Distributed and Multiplexed Fiber Optic Sensors II*. [S.l.], 1993. v. 1797, p. 76–109. Citado 5 vezes nas páginas 30, 31, 37, 38 e 39.

DANIELSON, B. Backscatter measurements on optical fibers. *Optical Fiber Characterization*, p. 1, 1981. Citado na página 26.

DANIELSON, B. *Optical Fiber Characterization: Backscatter time domain bandwidth, refracted near field, and interlaboratory comparisons*. [S.l.]: US Department of Commerce, National Bureau of Standards, 1982. v. 637. Citado 2 vezes nas páginas 32 e 33.

DUNCAN, R. G. et al. Ofdr-based distributed sensing and fault detection for single-and multi-mode avionics fiber-optics. In: *Joint Conference on Aging Aircraft*. [S.l.: s.n.], 2007. p. 16–19. Citado na página 32.

- DYER, S. D. et al. High spatial resolution distributed fiber sensor using raman scattering in single-mode fiber. In: OPTICAL SOCIETY OF AMERICA. *Conference on Lasers and Electro-Optics*. [S.l.], 2010. p. CFA6. Citado na página 45.
- EINSTEIN, A. Concerning an heuristic point of view toward the emission and transformation of light. *American Journal of Physics*, v. 33, n. 5, p. 367, 1965. Citado na página 22.
- ESSIAMBRE, R.-J. et al. Capacity limits of optical fiber networks. *Journal of Lightwave Technology*, IEEE, v. 28, n. 4, p. 662–701, 2010. Citado na página 20.
- ESSIAMBRE, R.-J.; TKACH, R. W. Capacity trends and limits of optical communication networks. *Proceedings of the IEEE*, IEEE, v. 100, n. 5, p. 1035–1055, 2012. Citado na página 20.
- FERNANDEZ, A. F. et al. Radiation-tolerant raman distributed temperature monitoring system for large nuclear infrastructures. *IEEE transactions on nuclear science*, IEEE, v. 52, n. 6, p. 2689–2694, 2005. Citado na página 45.
- FORGHIERI, F.; TKACH, R.; CHRAPLYVY, A. Fiber nonlinearities and their impact on transmission systems. *Optical Fiber Telecommunications IIIA*, San Diego, CA: Academic, v. 1, 1997. Citado na página 20.
- FUKASE, M. M. Efeitos não-lineares em sistemas de comunicações ópticas. 2010. Citado na página 20.
- GAUGLITZ, G. Direct optical sensors: principles and selected applications. *Analytical and bioanalytical chemistry*, Springer, v. 381, n. 1, p. 141–155, 2005. Citado na página 28.
- GILGEN, H. et al. Submillimeter optical reflectometry. *Journal of Lightwave Technology*, IEEE, v. 7, n. 8, p. 1225–1233, 1989. Citado na página 32.
- GRATTAN, K.; SUN, T. Fiber optic sensor technology: an overview. *Sensors and Actuators A: Physical*, Elsevier, v. 82, n. 1-3, p. 40–61, 2000. Citado 2 vezes nas páginas 31 e 43.
- HARTOG, A. Distributed fibre-optic temperature sensors: technology and applications in the power industry. *Power Engineering Journal*, IET, v. 9, n. 3, p. 114–120, 1995. Citado na página 43.
- HARTOG, A.; LEACH, A.; GOLD, M. Distributed temperature sensing in solid-core fibres. *Electronics letters*, IET, v. 21, n. 23, p. 1061–1062, 1985. Citado 3 vezes nas páginas 10, 41 e 42.
- HARTOG, A.; PAYNE, D. Remote measurement of temperature distribution using an optical fibre. 1982. Citado na página 40.
- HARTOG, A. H. *Distributed optical fibre measurements*. [S.l.]: Google Patents, 2007. US Patent 7,284,903. Citado na página 39.
- HAUS, J. *Optical Sensors*. [S.l.]: Wiley Online Library, 2010. Citado 2 vezes nas páginas 16 e 27.
- HAYES, W.; LOUDON, R. *Scattering of light by crystals*. [S.l.]: Courier Corporation, 2012. Citado na página 23.

HEADLEY, C.; AGRAWAL, G. *Raman amplification in fiber optical communication systems*. [S.l.]: Academic press, 2005. Citado na página 20.

HEADLEY, C.; AGRAWAL, G. P. *Raman amplification in fiber optical communication systems*. [S.l.]: Academic press, 2005. Citado na página 24.

HECHT, J. *City of light: the story of fiber optics*. [S.l.]: Oxford University Press on Demand, 2004. Citado na página 28.

HÖBEL, M. et al. High-resolution distributed temperature sensing with the multiphoton-timing technique. *Applied optics*, Optical Society of America, v. 34, n. 16, p. 2955–2967, 1995. Citado na página 43.

INAUDI, D.; GLISIC, B. Integration of fiber optic sensing systems into composite structures for oil & gas production and transport. In: *Fourth International Conference on Composite Materials for Offshore Operations, Houston, TX*. [S.l.: s.n.], 2005. Citado na página 46.

INAUDI, D.; GLISIC, B. Integration of distributed strain and temperature sensors in composite coiled tubing. In: *SPIE Smart Struct. and Mat. Conf.* [S.l.: s.n.], 2006. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 45.

JEDRZEJEWSKA-SZCZERSKA, M. et al. Ultrahigh-resolution detection techniques for biomedical applications of optical coherent tomography. In: INTERNATIONAL SOCIETY FOR OPTICS AND PHOTONICS. *Optical Methods, Sensors, Image Processing, and Visualization in Medicine*. [S.l.], 2004. v. 5505, p. 1–6. Citado na página 32.

JUNIOR, F. S. de A. Estudo da correlação no espalhamento raman stokes e anti-stokes da água. UFMG, 2016. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 22.

KEISER, G. *Comunicações por Fibras Ópticas-4*. [S.l.]: AMGH Editora, 2014. Citado 3 vezes nas páginas 19, 35 e 36.

KERSEY, A.; DANDRIDGE, A. Distributed and multiplexed fibre-optic sensor systems. *Journal of the institution of Electronic and Radio Engineers, IET*, v. 58, n. 5S, p. S99–S111, 1988. Citado 2 vezes nas páginas 31 e 33.

KINGSLEY, S. A. Distributed fiber-optic sensors: an overview. In: INTERNATIONAL SOCIETY FOR OPTICS AND PHOTONICS. *Fiber Optic and Laser Sensors III*. [S.l.], 1986. v. 566, p. 28–37. Citado 2 vezes nas páginas 30 e 31.

KITTEL, C. *Introdução À Física Do Estado Sólido*. [S.l.]: Grupo Gen-LTC, 2000. Citado na página 22.

LEE, B. Review of the present status of optical fiber sensors. *Optical fiber technology*, Elsevier, v. 9, n. 2, p. 57–79, 2003. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 28.

LEES, G. et al. 1.64/spl mu/m pulsed source for a distributed optical fibre raman temperature sensor. *Electronics Letters, IET*, v. 32, n. 19, p. 1809–1810, 1996. Citado na página 43.

LEFAROV, V.; MURAV'EV, V.; MITIN, S. Measurement of optical fiber parameters by the backscattering method. *Journal of Applied Spectroscopy, Springer*, v. 48, n. 3, p. 237–248, 1988. Citado na página 33.

- LI, X. et al. Fiber-optical sensors: basics and applications in multiphase reactors. *Sensors, Molecular Diversity Preservation International*, v. 12, n. 9, p. 12519–12544, 2012. Citado 3 vezes nas páginas 10, 28 e 30.
- LIMBERGER, H. G. et al. Optical low-coherence reflectometry (olcr) characterization of efficient bragg gratings in optical fiber. In: INTERNATIONAL SOCIETY FOR OPTICS AND PHOTONICS. *Photosensitivity and Self-Organization in Optical Fibers and Waveguides*. [S.l.], 1993. v. 2044, p. 272–284. Citado na página 32.
- LINK, G. M.; VIJAYKRISHNAN, N. Thermal trends in emerging technologies. In: IEEE COMPUTER SOCIETY. *Proceedings of the 7th International Symposium on Quality Electronic Design*. [S.l.], 2006. p. 625–632. Citado na página 45.
- LÜTH, H.; IBACH, H. *Solid-State Physics: An Introduction to Principles of Materials Science*. [S.l.]: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2003. Citado 2 vezes nas páginas 22 e 28.
- MACDONALD, R. Frequency domain optical reflectometer. *Applied Optics*, Optical Society of America, v. 20, n. 10, p. 1840–1844, 1981. Citado na página 32.
- MASTERS, B. R. Early development of optical low-coherence reflectometry and some recent biomedical applications. *Journal of Biomedical Optics*, International Society for Optics and Photonics, v. 4, n. 2, p. 236–248, 1999. Citado na página 32.
- MAUGHAN, S. M.; KEE, H. H.; NEWSON, T. P. 57-km single-ended spontaneous brillouin-based distributed fiber temperature sensor using microwave coherent detection. *Optics letters*, Optical Society of America, v. 26, n. 6, p. 331–333, 2001. Citado na página 25.
- MOHAMAD, H. et al. Monitoring tunnel deformation induced by close-proximity bored tunneling using distributed optical fiber strain measurements. In: *7th FMGM 2007: Field Measurements in Geomechanics*. [S.l.: s.n.], 2007. p. 1–13. Citado na página 45.
- NETTEST, G. Understanding otdr. *GN Nettest*, 2000. Citado 2 vezes nas páginas 35 e 36.
- OMAR, A. F. Fiber optic sensors: an introduction for engineers and scientists. *Sensor Review*, Emerald Group Publishing Limited, v. 33, n. 2, 2013. Citado na página 17.
- PARK, J. et al. Raman-based distributed temperature sensor with simplex coding and link optimization. *IEEE photonics technology letters*, IEEE, v. 18, n. 17, p. 1879–1881, 2006. Citado 2 vezes nas páginas 20 e 44.
- PARKER, T. et al. A fully distributed simultaneous strain and temperature sensor using spontaneous brillouin backscatter. *IEEE Photonics Technology Letters*, IEEE, v. 9, n. 7, p. 979–981, 1997. Citado na página 25.
- PLANCK, M. On the law of the energy distribution in the normal spectrum. *Ann. Phys*, v. 4, n. 553, p. 90, 1901. Citado na página 22.
- PRADHAN, H. S.; SAHU, P. K. Characterisation of raman distributed temperature sensor using deconvolution algorithms. *IET Optoelectronics*, IET, v. 9, n. 2, p. 101–107, 2015. Citado na página 20.
- RAMAN, C. V.; KRISHNAN, K. S. A new type of secondary radiation. *Nature*, v. 121, n. 3048, p. 501–502, 1928. Citado 2 vezes nas páginas 20 e 36.

- RAMASWAMI, R.; SIVARAJAN, K.; SASAKI, G. *Optical networks: a practical perspective*. [S.l.]: Morgan Kaufmann, 2009. Citado 3 vezes nas páginas 19, 28 e 37.
- REZENDE, S. M. *Materiais e dispositivos eletrônicos*. [S.l.]: Editora Livraria da Física, 2004. Citado na página 22.
- RIBEIRO, J. A. J. Características da propagação em fibras ópticas. *Instituto Nacional de Telecomunicações*, 1999. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 32.
- RIBEIRO, L. A. *Espalhamento Raman em fibras ópticas com aplicação em sensores distribuídos de temperatura*. Tese (Doutorado) — Tese de Doutorado. Programa de pós-graduação em engenharia e tecnologia espaciais/ciência e tecnologia de materiais e sensores, INPE, 2011. Citado 6 vezes nas páginas 22, 28, 32, 33, 39 e 55.
- ROGERS, A. Polarisation optical time domain reflectometry. *Electronics Letters, IET*, v. 16, n. 13, p. 489–490, 1980. Citado na página 31.
- ROGERS, A. J. et al. Advances in distributed optical fibre sensing. In: INTERNATIONAL SOCIETY FOR OPTICS AND PHOTONICS. *European Workshop on Optical Fibre Sensors*. [S.l.], 1998. v. 3483, p. 5–11. Citado na página 31.
- ROSSETTO, J. F. et al. Sensores distribuídos utilizando efeitos não-lineares em fibras ópticas para aplicação em estruturas inteligentes. [sn], 2004. Citado 4 vezes nas páginas 16, 34, 39 e 51.
- SALINAS, S. R. *Introdução a física estatística vol. 09*. [S.l.]: Edusp, 1997. Citado na página 22.
- SAUTER, E. *Nonlinear optics*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 1996. v. 44. Citado na página 21.
- SELKER, J. S. et al. Distributed fiber-optic temperature sensing for hydrologic systems. *Water Resources Research*, Wiley Online Library, v. 42, n. 12, 2006. Citado na página 25.
- SHADARAM, M. *Optical frequency domain reflectometry*. Tese (Doutorado), 1984. Citado na página 32.
- SHEN, Y.-R. The principles of nonlinear optics. *New York, Wiley-Interscience, 1984, 575 p.*, 1984. Citado na página 19.
- SILVA, L. C.; PONTES, M. J.; SEGATTO, M. E. Efeitos não lineares em fibras com aplicação em sensoriamento distribuído de temperatura. *Blucher Physics Proceedings*, v. 3, n. 1, p. 131–136, 2016. Citado 2 vezes nas páginas 20 e 26.
- SINGH, S. P.; GANGWAR, R.; SINGH, N. Nonlinear scattering effects in optical fibers. *Progress In Electromagnetics Research*, EMW Publishing, v. 74, p. 379–405, 2007. Citado 3 vezes nas páginas 21, 23 e 59.
- SINGH, S. P.; SINGH, N. Nonlinear effects in optical fibers: Origin, management and applications. *Progress In Electromagnetics Research*, EMW Publishing, v. 73, p. 249–275, 2007. Citado na página 19.
- SORIN, W. V.; BANEY, D. M. A simple intensity noise reduction technique for optical low-coherence reflectometry. *IEEE Photonics Technology Letters*, IEEE, v. 4, n. 12, p. 1404–1406, 1992. Citado na página 32.
- SOTO, M. et al. Distributed temperature sensor system based on raman scattering using correlation-codes. *Electronics Letters, IET*, v. 43, n. 16, p. 862–864, 2007. Citado na página 61.

SOTO, M. et al. High performance and highly reliable raman-based distributed temperature sensors based on correlation-coded otdr and multimode graded-index fibers. In: INTERNATIONAL SOCIETY FOR OPTICS AND PHOTONICS. *Third European Workshop on Optical Fibre Sensors*. [S.l.], 2007. v. 6619, p. 66193B. Citado na página 43.

SOTO, M. A. et al. Raman-based distributed temperature sensor with 1 m spatial resolution over 26 km smf using low-repetition-rate cyclic pulse coding. *Optics letters*, Optical Society of America, v. 36, n. 13, p. 2557–2559, 2011. Citado na página 44.

SOTO, M. A. et al. High-performance raman-based distributed fiber-optic sensing under a loop scheme using anti-stokes light only. *IEEE Photonics technology letters*, IEEE, v. 23, n. 9, p. 534–536, 2011. Citado na página 45.

TAKADA, K. et al. New measurement system for fault location in optical waveguide devices based on an interferometric technique. *Applied optics*, Optical Society of America, v. 26, n. 9, p. 1603–1606, 1987. Citado na página 32.

TANNER, M. G. et al. High-resolution single-mode fiber-optic distributed raman sensor for absolute temperature measurement using superconducting nanowire single-photon detectors. *Applied Physics Letters*, AIP, v. 99, n. 20, p. 201110, 2011. Citado na página 43.

THÉVENAZ, L. et al. Field tests of distributed temperature and strain measurement for smart structures. In: IEEE. *Lasers and Electro-Optics, 2001. CLEO/Pacific Rim 2001. The 4th Pacific Rim Conference on*. [S.l.], 2001. v. 1, p. I–I. Citado na página 46.

TOULOUSE, J. Optical nonlinearities in fibers: review, recent examples, and systems applications. *Journal of Lightwave Technology*, IEEE, v. 23, n. 11, p. 3625–3641, 2005. Citado na página 19.

UDD, E.; SPILLMAN-JR, W. B. *Fiber optic sensors: an introduction for engineers and scientists*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2011. Citado 4 vezes nas páginas 10, 28, 29 e 31.

UDD, E.; SPILLMAN, W. The emergence of fiber optic sensor technology. *Fiber Optic Sensors: An Introduction for Engineers and Scientists*, John Wiley & Sons, p. 1–8, 2011. Citado 6 vezes nas páginas 16, 17, 20, 27, 28 e 29.

UKIL, A.; BRAENDLE, H.; KRIPPNER, P. Distributed temperature sensing: review of technology and applications. *IEEE Sensors Journal*, IEEE, v. 12, n. 5, p. 885–892, 2012. Citado 2 vezes nas páginas 43 e 45.

WAKAMI, T.; TANAKA, S. 1.55- μm long-span fiber optic distributed temperature sensor. In: INTERNATIONAL SOCIETY FOR OPTICS AND PHOTONICS. *Tenth International Conference on Optical Fibre Sensors*. [S.l.], 1994. v. 2360, p. 134–138. Citado na página 43.

WEID, J. V. D.; PASSY, R.; GISIN, N. Coherent reflectometry of optical fiber amplifiers. *IEEE Photonics Technology Letters*, IEEE, v. 9, n. 9, p. 1253–1255, 1997. Citado na página 32.

WU, M.; WAY, W. I. Fiber nonlinearity limitations in ultra-dense wdm systems. *Journal of Lightwave Technology*, IEEE, v. 22, n. 6, p. 1483, 2004. Citado na página 19.

YIN, S. S.; RUFFIN, P. *Fiber optic sensors*. [S.l.]: Wiley Online Library, 2002. Citado 6 vezes nas páginas 27, 28, 30, 31, 33 e 34.

ZÓLOMY, A. Otdr-optical time domain reflectometer. 2010. Citado na página 36.

ZOU, X. et al. Limitations in 10 gb/s wdm optical-fiber transmission when using a variety of fiber types to manage dispersion and nonlinearities. *Journal of lightwave technology*, IEEE, v. 14, n. 6, p. 1144–1152, 1996. Citado na página 20.

ZOU, Y. et al. Impact of power amplifier nonlinearities in multi-user massive mimo downlink. In: IEEE. *Globecom Workshops (GC Wkshps), 2015 IEEE*. [S.l.], 2015. p. 1–7. Citado na página 20.