



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

**SENSORES MULTIPARÂMETROS BASEADOS EM REFLECTOMETRIA
RAMAN ANTI-STOKES NO DOMÍNIO DO TEMPO EM FIBRA ÓPTICA**

RECIFE

2023

MARIANNE STELY PEIXOTO E SILVA

**SENSORES MULTIPARÂMETROS BASEADOS EM REFLECTOMETRIA RAMAN
ANTI-STOKES NO DOMÍNIO DO TEMPO EM FIBRA ÓPTICA**

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Elétrica da Universidade Federal
de Pernambuco como parte dos requisitos para
obtenção do grau de Doutor em Engenharia
Elétrica.

Área de concentração: Fotônica

Orientador: Prof. Joaquim Ferreira Martins Filho, PhD.

Coorientador: Prof. Jehan Fonseca do Nascimento, Dr.

RECIFE

2023

Catálogo na fonte:
Bibliotecário Carlos Moura, CRB-4/1502

S586s Silva, Marianne Stely Peixoto e.
Sensores multiparâmetros baseados em reflectometria Raman anti-stokes no domínio do tempo em fibra óptica. / Marianne Stely Peixoto e Silva. – 2023.
162 f.: il.

Orientador: Prof. Dr. Joaquim Ferreira Martins Filho.
Tese (doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. Recife, 2023.
Inclui referências e apêndice.

1. Engenharia elétrica. 2. Sensor multiparâmetro. 3. OTDR. 4. Sensor a fibra óptica. 5. Sensor Raman distribuído. 6. Espalhamento Raman. I. Martins Filho, Joaquim Ferreira (orientador). II. Título.

621.3 CDD (22. ed.)

UFPE
BCTG/2023-204

MARIANNE STELY PEIXOTO E SILVA

**“SENSORES MULTIPARÂMETROS BASEADOS EM REFLECTOMETRIA
RAMAN ANTI-STOKES NO DOMÍNIO DO TEMPO EM FIBRA ÓPTICA”**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica, na área de concentração em Fotônica.

Aprovada em: 28/07/2023

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Joaquim Ferreira Martins Filho
(Orientador e Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Eduardo Fontana
(Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. João Batista Rosolem
(Examinador Externo)
Centro de Pesquisa Tecnológica e Desenvolvimento

Prof. Dr. José Luís Fabris
(Examinador Externo)
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof. Dr. Marcelo Martins Werneck
(Examinador Externo)
Universidade Federal do Rio de Janeiro

Dedico 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.

Ao meu noivo, Thiago Lima, cujo amor, encorajamento e carinho foram minha inspiração constante ao longo desta jornada acadêmica.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por sempre iluminar meus caminhos.

Ao meu orientador, Prof. Joaquim Ferreira Martins Filho, que sempre me direcionou pelos melhores caminhos na Pós-Graduação e pela honra de compartilhar sua experiência e fazer parte do Grupo de Sensores e Instrumentação, expresso meu profundo agradecimento.

Ao meu co-orientador, Prof. Jehan Fonsêca do Nascimento, por sua constante contribuição de longa data para minha formação como pesquisadora e por sua ajuda no desenvolvimento desta tese. O meu sincero agradecimento.

Aos professores Antônio Azevedo do DF-UFPE e Luís Leão do NICEN-UFPE Campus Agreste, pelos serviços de deposição de filmes metálicos nas fibras ópticas.

Aos membros da banca examinadora, por terem aceitado o convite para participar da defesa desta Tese e por suas valiosas contribuições.

Aos amigos que a Pós-Graduação me presenteou, Allamys, Carlos, Crislane, Eduardo, Hebio, Henrique, Keyla, Marcionilo, Raoní, Thales e Valdemir, pelo apoio e parcerias nos trabalhos e pelos muitos momentos de descontração.

À minha família, por todo apoio e motivação dado ao longo dessa jornada.

Ao meu noivo, Thiago Lima, pelo amor, apoio e cuidado de sempre.

À Sra. Andréa Tenório, secretária do PPGEE, por sua amizade e trabalho genuíno, dedicação e atenção dispensados a todos os membros do PPGEE.

Aos docentes e funcionários do programa de pós-graduação que contribuíram para minha formação intelectual e pessoal.

E a FACEPE, pela bolsa de Doutorado, ao CNPq, à CAPES e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFPE pelo suporte financeiro.

Por fim, agradeço a todos aqueles que, de alguma forma, contribuíram para a realização desta Tese.

A todos, deixo o meu mais sincero obrigado!

RESUMO

A demanda crescente por soluções de detecção versáteis e melhorias no desempenho de medições em ambientes operacionais desafiadores tem impulsionado extensas pesquisas em sensores de fibra óptica para alcançar operações aprimoradas. Uma abordagem promissora para melhorar os sistemas de detecção envolve a consideração de parâmetros específicos, como a expansão da faixa de operação e a medição simultânea de múltiplos parâmetros, especialmente quando esses parâmetros estão interligados, como é caso da temperatura e da corrosão, ou temperatura e do índice de refração. Esta Tese de Doutorado apresenta o aprimoramento das funcionalidades de um sensor distribuído de temperatura baseado em espalhamento Raman (SDT-R) em fibras ópticas, bem como propõe experimentalmente o desenvolvimento de um novo sensor multiparâmetro baseado em reflectometria Raman anti-Stokes no domínio do tempo. É realizado o aprimoramento de um sistema de detecção distribuída de temperatura por meio de espalhamento Raman em fibras ópticas, relacionado à faixa de operação de temperatura. Esse sistema utiliza um equipamento comercial de reflectometria óptica no domínio do tempo (OTDR) e amplificação através de fibra dopada com Érbio (EDFA). O desempenho do sensor é experimentalmente avaliado em uma ampla faixa de temperaturas, abrangendo desde $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ até $400\text{ }^{\circ}\text{C}$, e em distâncias, de até 27 km. São realizadas análises utilizando um tipo de fibra especial, com revestimento metálico, para a operação em altas temperaturas. Os resultados fornecem informações sobre a sensibilidade, precisão e resolução do sensor na ampla faixa de temperaturas. Além disso, é apresentado o desenvolvimento de um novo sensor multiparâmetro que combina as funcionalidades de detecção de temperatura, corrosão e índice de refração. Esse sensor incorpora cabeças sensoras, projetadas com diferentes estruturas de fibras ópticas, ao SDT-R tradicional para o monitoramento de corrosão e índice de refração. Os sensores são testados em experimentos para avaliar sua resposta a diferentes índices de refração, temperaturas e um processo controlado de corrosão, permitindo a determinação da taxa de corrosão. Os resultados demonstram que o sensor multiparâmetro é capaz de monitorar simultaneamente e de forma independente a corrosão e o índice de refração, ao longo de múltiplos pontos do link de fibra óptica, e a temperatura, de forma distribuída. Essa abordagem não apenas adiciona novas funcionalidades ao SDT-R, mas também aprimora os resultados de medição para os parâmetros analisados. A sensibilidade do sensor é de $0,5\text{ dB}/10^{-3}\text{ UIR}$, para variações do índice de refração na faixa de $1,3370 - 1,3840\text{ UIR}$, e de $0,74\text{ dB/nm}$ para a detecção da corrosão de 100 nm de alumínio depositados na extremidade clivada de uma fibra óptica. São exploradas as possíveis aplicações dos sensores em vários setores, com destaque para a indústria de óleo e gás, onde esses sensores podem atuar para aprimorar o monitoramento e a manutenção de infraestruturas críticas. Ao integrar medida simultânea de múltiplos parâmetros em um único sensor essa abordagem oferece uma solução versátil e eficaz para atender às necessidades de medição em ambientes operacionais desafiadores.

Palavras-chave: sensor multiparâmetro; OTDR; sensor a fibra óptica; sensor Raman distribuído; Espalhamento Raman.

ABSTRACT

The increasing demand for versatile detection solutions and improved measurement performance in challenging operational environments has driven extensive research in fiber optic sensors to achieve enhanced operations. A promising approach to enhancing detection systems involves considering specific parameters, such as expanding the operating range and simultaneously measuring multiple parameters, especially when these parameters are interconnected, as is the case with temperature and corrosion or temperature and refractive index. This doctoral thesis presents the enhancement of functionalities of a distributed temperature sensor based on Raman scattering (DTS-R) in optical fibers and experimentally proposes the development of a new multiparameter sensor based on time-domain anti-Stokes Raman reflectometry. The enhancement of a distributed temperature detection system through Raman scattering in optical fibers is performed, focusing on the temperature operating range. This system utilizes a commercial optical time-domain reflectometry (OTDR) equipment and amplification through erbium-doped fiber amplifiers (EDFA). The sensor's performance is experimentally evaluated over a wide temperature range, spanning from -196 °C to 400 °C, and over long distances, up to 27 km. Analyses are conducted using a special type of fiber with a metallic coating for high-temperature operation. The results provide information about the sensor's sensitivity, precision, and resolution across the wide temperature range. Additionally, the development of a new multiparameter sensor combining temperature, corrosion, and refractive index detection functionalities is presented. This sensor incorporates sensor heads designed with different optical fiber structures into the traditional DTS-R for corrosion and refractive index monitoring. The sensors are tested in experiments to evaluate their response to different refractive indices, temperatures, and a controlled corrosion process, enabling the determination of the corrosion rate. The results demonstrate that the multiparameter sensor is capable of simultaneously and independently monitoring corrosion and refractive index along multiple points of the fiber link, as well as temperature in a distributed manner. This approach not only adds new functionalities to DT-R but also enhances measurement results for the analyzed parameters. The sensor's sensitivity is 0.5 dB/10⁻³ RIU for refractive index variations in the range of 1.3370-1.3840 RIU and 0.74 dB/nm for the detection of 100 nm aluminum corrosion deposited on the cleaved end of an optical fiber. The possible applications of the sensors in various sectors are explored, with emphasis on the oil and gas industry, where these sensors can contribute to enhancing the monitoring and maintenance of critical infrastructures. By integrating simultaneous measurement of multiple parameters in a single sensor, this approach offers a versatile and effective solution to meet measurement needs in challenging operational environments.

Keywords: multiparameter sensor; OTDR (Optical Time-Domain Reflectometry); fiber optic sensor; distributed Raman sensor; Raman scattering.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Distribuição dos sensores multiparâmetros de fibra óptica para o monitoramento simultâneo de temperatura, índice de refração e corrosão nos dutos de poços de petróleo. As cabeças sensoras são representadas por pontos pretos ao longo dos dutos.	24
Figura 2 – Espectro de espalhamento Rayleigh, Brillouin e Raman em fibra óptica. . .	29
Figura 3 – Diagrama de nível de energia do espalhamento Raman espontâneo.	31
Figura 4 – Traço OTDR típico da potência óptica em função da distância.	35
Figura 5 – Diagrama de blocos de um sistema Raman-OTDR típico.	37
Figura 6 – Elemento sensor de corrosão e sequência de etapas durante o processo de corrosão em um filme fino metálico até a remoção completa do metal. . . .	42
Figura 7 – (a) Esquema do elemento sensor de índice de refração, mostrando a estrutura da fibra óptica com face clivada. (b) Sensor imerso em uma solução sob teste	45
Figura 8 – Sensor distribuído usando OTDR.	49
Figura 9 – Esquema simplificado de um sensor quase-distribuído usando OTDR (CIBULA; DONLAGIC, 2007).	51
Figura 10 – Esquema de sensor à fibra óptica para detecção distribuída de temperatura proposto por Dakin e colaboradores (DAKIN et al., 1985a).	53
Figura 11 – Configuração experimental do sensor distribuído de temperatura baseado em Espalhamento Raman implementado com dispositivos de semicondutores (HARTOG; LEACH; GOLD, 1985).	54
Figura 12 – Arranjo experimental para detecção distribuída de temperatura baseado em espalhamento Raman usando pulsos codificados e amplificação Raman discreta (BOLOGNINI et al., 2007).	55
Figura 13 – Esquematização do arranjo experimental para detecção distribuída de temperatura baseado em espalhamento Raman usando OTDR comercial e EDFA com ganho controlado (BASSAN et al., 2016).	57
Figura 14 – Curvas OTDR para o primeiro ponto de aquecimento (carretel 2): (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; citebassan2016distributed.	57
Figura 15 – O diagrama de blocos da medição de temperatura do SDT-R Raman em ambiente de Nitrogênio líquido (XIN; GUAN, 2019).	58

Figura 16 – Esquema de sensor à fibra óptica para monitorar corrosão em múltiplos pontos proposto por Bennet e MacLaughlin. (BENNETT; MCLAUGHLIN, 1995).	65
Figura 17 – (a) Diagrama de blocos do sistema sensor; (b) A ilustração esquemática do sensor de corrosão por fibra óptica com filme fino de Fe-C. (DONG et al., 2006).. . . .	67
Figura 18 – Configuração experimental do sensor de corrosão multiponto. As cabeças sensoras estão enumeradas de 1 à 7. (MARTINS-FILHO et al., 2007).. . . .	68
Figura 19 – Configuração experimental do sensor de corrosão multiponto com OTDR amplificado. As cabeças sensoras então enumeradas de 1 à 14. (NASCIMENTO et al., 2012).. . . .	70
Figura 20 – Montagem experimental utilizada para testar o sensor de corrosão com dupla camada metálica (OLIVEIRA et al., 2021).	73
Figura 21 – Diagrama esquemático do (a) elemento sensor proposto e (b) sistema experimental baseado em interferômetros de fibra Mach-Zehnder (XIONG et al., 2014).	81
Figura 22 – Sensores de temperatura e RI baseados em SMF-MMF-SMF alongados com uma região cônica (LUO et al., 2015).	83
Figura 23 – Sensor óptico de índice de refração de líquidos baseado em reflexão de Fresnel da luz anti-Stokes (WANG et al., 2018).	88
Figura 24 – (a) Configuração experimental usada para implementar o SDT-R, usando OTDR comercial e EDFA; (b) Configuração do EDFA implementado.	92
Figura 25 – Filtro óptico passa-banda customizado com duas portas de saída referentes as bandas anti-Stokes (OUT 1 - 1450 nm) e Stokes (OUT 2 - 1660 nm), e espectro de saída do filtro.	93
Figura 26 – Curvas OTDR de intensidades do sinal retroespalhado Raman anti-Stokes (a) e Stokes (b) para 600 m de fibra óptica aquecidas até 100 °C	96
Figura 27 – calibração de temperatura criada a partir da intensidade das curvas anti-Stokes normalizadas para pulsos-OTDR de 100 ns.	98
Figura 28 – Picos de intensidades normalizada do sinal retroespalhado Raman anti-Stokes e de temperatura medidos usando pulsos-OTDR de (a-b) 100 ns e (c-d) 4000 ns, para 620 m de fibra óptica aquecidas até 100 °C.	99
Figura 29 – Curvas OTDR do sinal Raman anti-Stokes retroespalhados (a) e distribuição espacial de temperatura (b) para temperaturas entre 27 e 400 °C.	100
Figura 30 – Curvas OTDR do sinal Raman anti-Stokes retroespalhados obtidas usando 3 m de fibras óptica com revestimento metálico aquecidos de 27 a 220 °C e pulsos-OTDR de 100 ns.	101

Figura 31 – Imagens de amostras de fibra óptica com revestimento metálico aquecida até 300 °C, obtidas utilizando a técnica de microscopia de campo escuro:(a) amostra 1, (b) amostra 2 e (c) amostra 3.	103
Figura 32 – Fotografias do processo de resfriamento criogênico do carretel Fibr-2: (a) carretel de Fibr-2 submerso em nitrogênio líquido (-196,15°C), OTDR, carretéis Fibr-1 (azul) e Fibr -3 (amarelo); (b) obtenção do traço OTDR do sinal anti-Stokes para a temperatura de -46,7°C.	104
Figura 33 – Curvas OTDR do sinais anti-Stokes retroespalhados (a) e distribuição espacial de temperatura (b), para temperaturas entre -196,15°C e -0,8 °C, 150 m de fibra óptica, pulsos-OTDR de 100 ns.	105
Figura 34 – Correlação entre temperaturas estimadas pelo SDT-R e temperaturas aferidas com um termômetro com o ajuste de regressão de primeira ordem.	106
Figura 35 – Precisão do sensor em termos de erro absoluto em função da temperatura medida com SDT-R.	107
Figura 36 – Configuração experimental utilizada para implementar o sistema de sensores baseado em Espalhamento Raman em fibras ópticas para monitoramento simultâneo de temperatura, índice de refração e corrosão.	110
Figura 37 – Suporte para fibras ópticas com revestimento metálico.	113
Figura 38 – Configuração experimental usada para caracterizar as amostras de fibras de camada metálica com 100 nm de Al, metalizadas por sputtering.	115
Figura 39 – Potência óptica refletida em função do tempo de corrosão para duas amostras de fibras metalizadas com 100 nm de Al no Al-Etch.	116
Figura 40 – Potência óptica refletida em função do tempo de corrosão para duas amostras de fibras metalizadas com 100 nm de Al no Si Iso etch.	118
Figura 41 – Picos de intensidade de sinais Raman anti-Stokes na cabeça sensoras I, imersa em solução de n=1,3500 URI, e cabeça sensora II, durante corrosão de alumínio 100 nm em ácido Al-etcher e região com 24 metros de fibra óptica monomodo mantida a 55 °C.	121
Figura 42 – Intensidade anti-Stokes relativa refletida na cabeça do sensor II em função da espessura da camada de alumínio removida durante a corrosão por Al-etcher.	122
Figura 43 – Picos de intensidade de sinais Raman anti-Stokes na cabeça sensora II, durante corrosão de alumínio 100 nm em ácido Si Iso-Etch e região com 24 metros de fibra óptica monomodo mantida a 45 °C.	122
Figura 44 – Intensidade anti-Stokes relativa refletida na cabeça do sensor II em função da espessura da camada de alumínio removida durante a corrosão por Si Iso-Etch	124
Figura 45 – Variação do índice de refração para diferentes concentrações de soluções de cloreto de sódio.	125

Figura 46 – Intensidade anti-Stokes da reflexão de Fresnel na cabeça sensora I em função do índice de refração.	126
Figura 47 – (a) Intensidade do sinal anti-Stokes Raman retroespalhado em função da temperatura e (b) correlação entre as temperaturas medidas pelo SDT-R multiparâmetro e por termômetro para o carretel de fibra imerso em solução de cloreto de sódio de diferentes concentrações e no ar.	128
Figura 48 – (a)) Intensidade Anti-Stokes Raman na região de monitoramento para a solução com $n = 1,3545$ UIR para diferentes temperaturas (30 °C – 53 °C); (b) intensidade anti-Stokes da reflexão de Fresnel na cabeça sensora I em função da temperatura do líquido.	129
Figura 49 – Variação do índice de refração da solução de cloreto de sódio a 10% em função da temperatura do líquido.	130
Figura 50 – Variação do índice de refração em função da temperatura para soluções de NaCl com diversas concentrações.	132
Figura 51 – Picos de intensidade dos sinais anti-Stokes Raman na cabeça sensora I, para diferentes índices de refração, e na cabeça sensora II, durante e após a corrosão do alumínio de 100 nm em ácido Al-etcher, e duas regiões com 24 metros da fibra mantida dentro do forno, enquanto o restante está a 26 °C. .	133

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	– Estudos de medidas de longa distância em sistemas de sensoriamento	63
Tabela 2	– Especificações do OTDR MT9083C2 ACCESS Master. Fonte: Manual de operação do MT9083 Series ACCESS Master, 2016	91
Tabela 3	– Temperatura de operação e largura temporal do pulso-OTDR em sistemas SDT-R apresentados por diversos autores.	94
Tabela 4	– Valores experimentais dos índices de refração para soluções com diferentes concentrações de NaCl e temperaturas entre 30 °C e 53°C.	131

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ADC	Analog-to-Digital Converter - conversor analógico-digital
Al	Alumínio
AS	Anti-Stokes
ASE	Amplified Spontaneous Emission - Emissão Espontânea Amplificada
CW	Continuous Wave - onda contínua
DSP	Digital Signal Processor - Processador Digital de Sinais
EDFA	Erbium Doped Fiber Amplifier - Amplificador de Fibra Dopada a Érbio
FBG	Fiber Bragg Grating
IR	Índice de refração
laser	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation - Amplificação da Luz por Emissão Estimulada de Radiação
LRA	Lumped Raman Amplification - Amplificador Raman Discreto
OFDR	Optical Frequency Domain Reflectometry - Reflectometria Óptica no Domínio da Frequência
OTDR (Technique)	Optical Time-Domain Reflectometry (Technique)- Reflectometria Óptica no Domínio do Tempo (Técnica)
OTDR	Óptical Time-Domain Reflectometer - Reflectômetro Óptico no Domínio do Tempo
SBS	Stimulated Brillouin Scattering - Espalhamento Brillouin Estimulado
SDT-R	Sensor Distribuído de Temperatura baseado em Espalhamento Raman
SNR	Signal-to-Noise Ratio - Razão Sinal-Ruído
SRS	Spontaneous Raman Scattering - Espalhamento Raman Espontâneo

WDM	Wavelength-Division Multiplexing - Multiplexação por Divisão de Comprimento de Onda
S	Stokes
T	Temperatura

LISTA DE SÍMBOLOS

E_0	Estado fundamental de energia
E_n	n-ésimo estado de energia
h	Contante de Planck
ν	Frequência da onda
ν_S	Frequência da onda Stokes
ν_{AS}	Frequência da onda anti-Stokes
$\Delta\nu$	Deslocamento de frequência
k_B	Constante de Boltzmann
τ	Período de Pulso
S	Fator de captura
σ_S	Resolução espacial
σ_T	Resolução de temperatura
v_g	Velocidade de grupo
P_s	Potência do sinal retroespalhado
P_0	Potência incidente na entrada da fibra
$\aleph_s$	Coefficiente de espalhamento Reyleigh
$\aleph$	Coefficiente 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, K_{AS}	Contante de proporcionalidade

λ_S	Comprimento de onda Stokes
λ_{AS}	Comprimento de onda anti-Stokes
n	Índice de refração do meio
n_f	Índice de refração do núcleo da fibra
n_m	Índice de refração medido.
n_0	Índice de refração de referência.
r_i	Coeficiente de reflexão de Fresnel interface i
R	Reflectância
Φ	Mudança de fase da luz
κ	O coeficiente de extinção da luz
T	Temperatura

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
1.1	MOTIVAÇÃO	21
1.2	ORGANIZAÇÃO DA TESE DE DOUTORADO	24
2	PRINCÍPIO DE DETECÇÃO	27
2.1	ESPALHAMENTO DE LUZ EM FIBRAS ÓPTICAS	27
2.2	REFLECTOMETRIA ÓPTICA NO DOMÍNIO DO TEMPO	33
2.3	PRINCÍPIOS DE OPERAÇÃO DA TERMOMETRIA DISTRIBUÍDA BASEADA EM RAMAN	36
2.4	MONITORAMENTO DE CORROSÃO UTILIZANDO FIBRA ÓP- TICA DE FACE METALIZADAS	41
2.5	MONITORAMENTO DE ÍNDICE DE REFRAÇÃO BASEADO NA REFLEXÃO DE FRESNEL DA LUZ ANTI-STOKES	44
3	SENSORES À FIBRA ÓPTICA: REVISÃO DA LITERATURA . .	46
3.1	SENSORES ÓPTICOS	46
3.1.1	Sensores distribuídos	48
3.1.2	Sensores quase-distribuídos	50
3.2	SENSORES DE TEMPERATURA BASEADO EM ESPALHAMENTO RAMAN EM FIBRAS ÓPTICAS	52
3.3	SENSORES DE CORROSÃO À FIBRA ÓPTICA	65
3.4	SENSORES MULTIPARÂMETROS	74
4	SENSOR DISTRIBUÍDO DE TEMPERATURA BASEADO EM ESPALHAMENTO RAMAN DE AMPLA FAIXA DE OPERAÇÃO DE TEMPERATURA (-196 ATÉ +400 °C)	90
4.1	SENSOR DISTRIBUÍDO DE TEMPERATURA BASEADO EM ES- PALHAMENTO RAMAN	90
4.1.1	Configuração Experimental	90
4.2	RESULTADOS E DISCUSSÕES	95
4.3	CONCLUSÕES	107
5	SENSOR À FIBRA ÓPTICA MULTIPARÂMETRO PARA O MONITORAMENTO SIMULTÂNEO DE TEMPERATURA, ÍNDICE DE REFRAÇÃO E CORROSÃO BASEADO EM RAMAN ANTI-STOKES	109

5.1	CONFIGURAÇÃO EXPERIMENTAL	109
5.1.1	Processo de Fabricação de Fibras Ópticas com Camada Metálica . . .	112
5.1.1.1	Caracterização Experimental das Fibras Ópticas Metalizadas	114
5.2	RESULTADOS E DISCUSSÕES	117
5.3	CONCLUSÃO	134
6	CONCLUSÃO E PERSPECTIVAS FUTURAS	136
6.1	CONTRIBUIÇÕES DA TESE DE DOUTORADO	137
6.2	PROPOSTA PARA TRABALHOS FUTUROS	139
	REFERÊNCIAS	140
	APÊNDICE A - LISTA DE PUBLICAÇÕES	164

1 INTRODUÇÃO

Os sensores à fibra óptica têm sido objeto de estudo há mais de 90 anos. Heinrich Lamm foi, provavelmente, um dos pioneiros no desenvolvimento desses sensores, quando, em 1930, tentou criar um gastroscópio flexível utilizando fibras ópticas (LAMM, 1930). Desde então, inúmeros sensores ópticos foram propostos para monitorar diversas grandezas como corrosão, temperatura, índice de refração, pressão, umidade, campo magnético, entre outras (UDD; SPILLMAN, 2011; BOLOGNINI; HARTOG, 2013). O vasto campo de aplicações potenciais tem gerado um interesse contínuo da pesquisa e desenvolvimento de sistemas ópticos à fibra óptica.

O uso de sensores à fibra óptica oferece uma série de vantagens em relação aos sensores eletrônicos tradicionais e mecânicos (HAUS, 2010). Suas características inerentes permitem o desenvolvimento de sensores leves, compactos e simples, capazes de realizar medidas multiplexadas ou distribuídas com segurança e confiabilidade (HAUS, 2010). Além disso, as fibras ópticas são estruturas passivas, o que as torna imunes a interferências eletromagnéticas externas. Esses sensores também podem operar a longas distâncias, permitindo um sistema de monitoramento remoto em locais de difícil acesso. Sua capacidade de operar em ambientes hostis, como alta temperatura, atmosferas explosivas e ambientes corrosivos, torna-os ideais para monitorar grandezas em condições adversas.

Além das propriedades conhecidas, os sensores de fibra óptica também fornecem oportunidades interessantes para a miniaturização e o projeto de sensores capazes de medir independentemente e simultaneamente mais de um parâmetro físico ou químico (PEVEC; DONLAGIC, 2021). Essas possibilidades têm sido exploradas mais intensamente recentemente, ampliando as aplicações potenciais dessa classe de sensores e permitindo a substituição de outros tipos de sensores ópticos e não ópticos com a mesma finalidade (PEVEC; DONLAGIC, 2021; UDD; SPILLMAN, 2011).

Ao longo das últimas décadas, várias técnicas baseadas em fibra óptica têm sido desenvolvidas para uma variedade de finalidades de sensores diferentes, fornecendo uma base para uma tecnologia de medição eficaz. Atualmente, os sensores de fibra óptica se tornaram ferramentas indispensáveis para o monitoramento de grandezas em diversos setores, como a indústria de energia elétrica, que busca incorporar capacidades de monitoramento, análise, controle e comunicação por meio da tecnologia Smart Grid (redes inteligentes). Nesse sentido, há grande demanda por sensores para fornecer interface de informações para a implementação

da rede inteligente (Huang et al., 2010).

A temperatura é uma das grandezas mais relevantes e amplamente monitoradas em diversos setores (SILVA; SEGATTO; CASTELLANI, 2022). Nesse contexto, os sensores à fibra óptica têm se destacado como uma solução versátil e eficiente para o monitoramento distribuído da temperatura (VENKETESWARAN et al., 2022). Essa tecnologia tem sido aplicada em áreas como a indústria de energia elétrica, petróleo e gás, setor aeroespacial, entre outros, onde a monitoração precisa da temperatura é essencial para garantir a segurança, eficiência e confiabilidade dos processos e equipamentos (DATTA; SANKAR; SRINIVASAN, 2022). Com os sensores de fibra óptica, é possível obter informações em tempo real sobre a variação térmica em diferentes regiões, possibilitando a tomada de decisões e ações corretivas de forma mais precisa e efetiva. Os sensores baseados em Raman utilizam a técnica OTDR para a estimativa da temperatura, que é realizada a partir do monitoramento dos sinais retroespalhado anti-Stokes e Stokes, derivados do espalhamento Raman na fibra óptica (BOLOGNINI; HARTOG, 2013; SILVA; SEGATTO; CASTELLANI, 2022).

O fenômeno de corrosão tem grande destaque na vida moderna. Nesse sentido, os sensores à fibra óptica para o monitoramento da corrosão têm sido objeto de grande interesse para diversos ramos (RAMANI; KUANG, 2021). Setores produtivos que utilizam materiais metálicos, como indústrias de gás e petróleo, geração e distribuição de energia elétrica, construções civis e militares, têm grande interesse em monitorar a corrosão em suas instalações devido aos impactos financeiros, materiais e pessoais decorrentes desse processo (GENTIL, 2011). Além disso, a temperatura das estruturas metálicas também é um parâmetro importante no monitoramento da corrosão, uma vez que ambientes com altas temperaturas podem acelerar o processo corrosivo (FEIJÃO, 2010).

O índice de refração é outra propriedade óptica relevante, pois descreve como a luz se propaga através de um meio e seu monitoramento é especialmente útil para identificar e determinar a concentração de substâncias orgânicas (PATIL; PATIL; GHOSH, 2020). A medição precisa do índice de refração é essencial em diversos setores, incluindo a indústria farmacêutica, monitoramento ambiental, controle de qualidade e pesquisa científica (LIAO et al., 2010). No entanto, como o índice de refração pode ser afetado pela temperatura, em muitos casos a temperatura também deve ser conhecida para uma medição do IR precisa (PEVEC; DONLAGIC, 2021).

Neste contexto, esta Tese de Doutorado apresenta e demonstra experimentalmente um novo sensor óptico baseado em espalhamento Raman em fibras ópticas monomodo padrão, com a capacidade de monitorar simultaneamente temperatura, índice de refração e corrosão. A arquitetura proposta para o sensor distribuído de temperatura baseado em Raman (SDT-R) permitiu o desenvolvimento de um sistema capaz de monitorar simultaneamente os três parâmetros. Isso é alcançado através da detecção de variações na intensidade dos sinais anti-Stokes retroespalhados, utilizando um equipamento comercial de reflectometria óptica no

domínio do tempo, combinado com um amplificador de fibra dopada com Érbio (EDFA) padrão. Essas características tornam o sensor proposto interessante para potenciais aplicações em diversos setores, principalmente para aplicações na indústria de óleo e gás.

Embora já tenham sido relatados estudos individuais sobre monitoramento de temperatura e corrosão utilizando as técnicas de OTDR e OTDR amplificado (MARTINS-FILHO et al., 2007; NASCIMENTO et al., 2012), o sistema de monitoramento integrado de temperatura e corrosão proposto, usando a arquitetura DTS-R, é inovador. Além disso, é incluída a medição do índice de refração de líquidos por meio da reflexão de Fresnel da luz anti-Stokes Raman, conforme apresentado por Wang et. al. (WANG et al., 2018).

O sensor proposto é avaliado em diversas condições, incluindo ampla faixa de temperatura e operação em distâncias de até 27 km. O principal destaque desse sistema é a capacidade de multiplexar múltiplos sensores em um único enlace de fibra óptica de longo comprimento. Isso permite o monitoramento simultâneo de três parâmetros diferentes por meio de um único sistema de interrogação, no comprimento de onda anti-Stokes Raman, sem a necessidade de fontes ópticas adicionais, comutação ou filtragem. Esse estudo irá contribuir para o avanço do conhecimento nessa área, bem como para a aplicação prática dos sensores ópticos em ambientes reais

1.1 MOTIVAÇÃO

A detecção multiparâmetro desempenha um papel fundamental no avanço da tecnologia de sensores ópticos, especialmente em aplicações que exigem monitoramento preciso e abrangente de diferentes parâmetros físicos (SONG et al., 2022). A capacidade de monitorar simultaneamente múltiplos parâmetros é tida como interessante e oferece uma série de vantagens significativas em relação aos sensores convencionais de detecção única (PEVEC; DONLAGIC, 2021).

Em primeiro lugar, a detecção multiparâmetro permite uma análise mais abrangente do ambiente ou do sistema em estudo (PEVEC; DONLAGIC, 2021). Ao combinar a medição de vários parâmetros, é possível obter uma visão mais completa e precisa das condições em tempo real. Isso é particularmente importante em setores como indústria, petróleo e gás, monitoramento ambiental e geração de energia, onde a compreensão abrangente dos diferentes parâmetros pode fornecer informações valiosas para tomadas de decisão e controle de processos.

Além disso, a detecção multiparâmetro oferece economia de tempo, recursos e espaço. Em vez de implantar vários sensores individuais para monitorar cada parâmetro separadamente, a utilização de um único sensor multiparâmetro simplifica a instalação, reduz o número de componentes e minimiza a ocupação de espaço. Isso resulta em uma solução mais eficiente e econômica, com menor custo de implantação e manutenção.

Outro benefício importante é a correlação de dados (SHANG et al., 2021). Ao monitorar vários parâmetros simultaneamente, é possível identificar correlações e interações entre eles, o que pode revelar conhecimentos adicionais e relações de causa e efeito. Isso é particularmente relevante em sistemas complexos, onde as mudanças em um parâmetro podem afetar diretamente outros parâmetros. A detecção multiparâmetro permite a análise dessas relações, proporcionando uma compreensão mais profunda do sistema e a possibilidade de prever e prevenir problemas potenciais.

A corrosão representa um dos principais mecanismos de danos que impactam as estruturas metálicas (BENNETT; MCLAUGHLIN, 1995). Nesse contexto, o monitoramento em campo da corrosão desempenha um papel crucial ao fornecer informações essenciais para a avaliação da integridade dessas estruturas (QIAO; ZHOU; OU, 2006). Além disso, em ambientes com temperaturas elevadas, os metais expostos podem catalisar reações químicas com o ambiente, acelerando o processo de corrosão (GENTIL, 2011). Portanto, o monitoramento simultâneo da corrosão e da temperatura das estruturas metálicas se torna relevante, uma vez que os efeitos térmicos e corrosivos estão intrinsecamente relacionados (GENTIL, 2011).

O índice de refração de um meio é uma medida óptica imperativa, pois reflete as propriedades ópticas desse meio. Existem várias razões pelas quais o monitoramento do índice de refração é essencial. Uma delas é sua aplicação no controle de qualidade e na caracterização de materiais. Ao medir o índice de refração de um material, é possível obter informações sobre sua composição e pureza, além de identificar possíveis variações ou impurezas que possam afetar suas propriedades físicas e ópticas (PATIL; PATIL; GHOSH, 2020). Além disso, o monitoramento do índice de refração em ambientes naturais e industriais pode fornecer informações valiosas sobre a composição e qualidade dos fluidos (PATIL; PATIL; GHOSH, 2020). Na indústria de petróleo e gás, o monitoramento do índice de refração de fluidos em reservatórios pode ajudar a identificar a presença de hidrocarbonetos ou outras substâncias indesejadas (MOSLAN et al., 2023; EDOUARD et al., 2022; BROWN; HARTOG, 2002).

A determinação do índice de refração de líquidos, no entanto, é influenciada pela temperatura, tornando necessário conhecer a temperatura para extrair informações completas sobre a composição do líquido (WANG et al., 2018). A sensibilidade à temperatura dos líquidos significa que diferentes substâncias podem ter índices de refração semelhantes, mas variar em relação à forma como seus índices de refração mudam com a temperatura (YUNUS, 1992). Portanto, a combinação do monitoramento do índice de refração com a medição da temperatura é essencial para correlacionar as variações observadas no índice de refração com mudanças na composição do líquido, permitindo uma caracterização mais precisa em diferentes condições de temperatura.

A temperatura é um parâmetro crítico em muitos processos industriais, reações químicas e sistemas de controle (DATTA; SANKAR; SRINIVASAN, 2022). Ao obter medições precisas da temperatura, é possível monitorar o desempenho térmico de equipamentos, prevenir falhas e

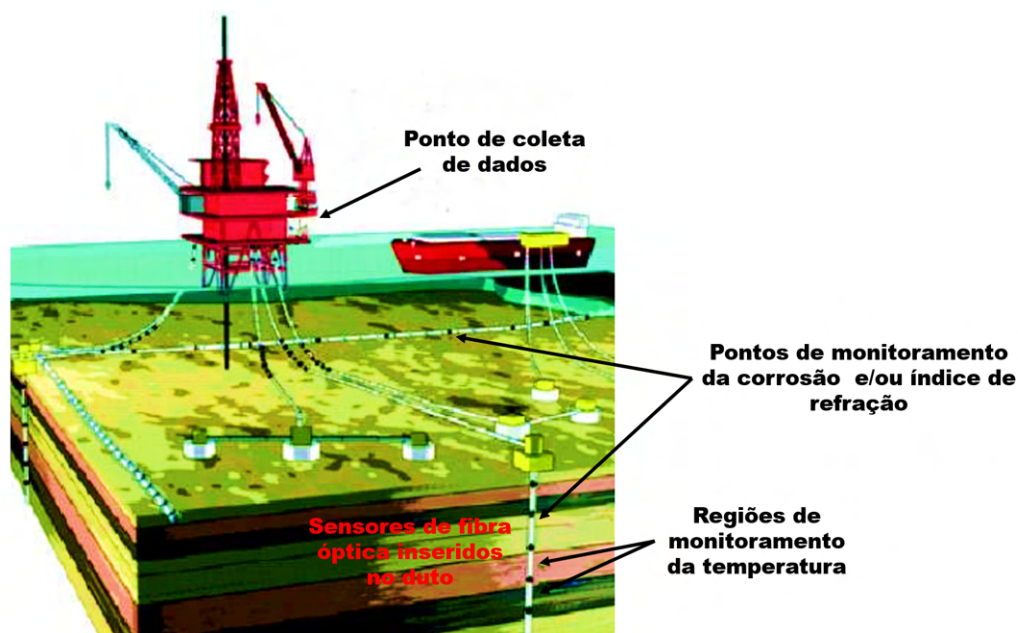
garantir a segurança operacional. De modo que, os projetos de detecção distribuída por fibra são óptica têm grandes aplicabilidades nos mais variados ramos (BOLOGNINI et al., 2006).

Portanto, ao combinar o monitoramento do índice de refração, temperatura e corrosão em um único sensor, como proposto nesta Tese de Doutorado, é possível obter um conjunto completo de informações relacionadas ao sistema em estudo. Do ponto de vista instrumental, os sensores multiparâmetro para monitoramento da temperatura, índice de refração e corrosão, é simples e compacto, capaz de realizar medidas práticas e rápidas. Faz uso dos recursos de um equipamento OTDR combinado a um amplificador do tipo EDFA, e utiliza os sinais retroespalhados Raman anti-Stokes, gerados em fibras óptica, para monitorar simultaneamente temperatura, índice de refração e corrosão. Desse modo, o sensor também apresenta custo reduzido quando comparado a esquemas individuais e análogos para o monitoramento das mesmas grandezas. Isso porque, componentes fundamentais desses esquemas são compartilhados, como é o caso do OTDR e do amplificador. Além disso, o sensor é capaz de operar em uma ampla faixa de temperatura, sendo capaz de medir desde de temperaturas criogênicas (-196°C) até altas temperaturas ($+400^{\circ}\text{C}$), com uma resolução de 2°C e sensibilidade $0,243\text{ dB}/^{\circ}\text{C}$. O sensor também é capaz de medir índices de refração na faixa de $1,3370 - 1,3840$ UIR (unidades de índice de refração), com sensibilidade de $0,5\text{ dB}/10^{-3}$, além de medir a taxa de corrosão com uma sensibilidade de $0,76\text{ dB/nm}$ na faixa sensível do sensor.

O sensor distribuído de temperatura e corrosão à base de fibra óptica pode ser proposto para um grande número de aplicações potenciais. Dentre as diversas possibilidade de aplicações, pode-se destacar aplicações na indústria do petróleo. A título de motivação, a Figura 1 ilustra a proposta de sensoriamento multiparamétrico em poços de petróleo. No sistema da Figura 1, toda a extensão dos dutos de poços de petróleo e estruturas adjacentes são monitoradas, onde a medição de temperatura é feita de forma distribuída na estrutura, enquanto a corrosão e o índice de refração podem ser monitorados em múltiplos pontos discretos ao longo da estrutura.

Os dutos de poços de petróleo estão constantemente sujeitos ao processo de corrosão. A corrosão dessas estruturas causa o afinamento das paredes resultando na formação de furos, que dão origem a problemas operacionais, como a diminuição da produção, e ambientais, com vazamentos (NASCIMENTO, 2013). No monitoramento de dutos e tubulações, como a inspeção por fibra óptica, a variação do índice de refração ao longo dessas estruturas, é possível detectar vazamentos, outros problemas que possam comprometer a integridade do sistema. Isso contribui para a segurança operacional e a prevenção de acidentes. Além disso, poços profundos (região do pré-sal) são mantidos sob altas temperaturas (acima de 200°C) (GENTIL, 2011). Desse modo, o monitoramento da temperatura, do índice de refração e da corrosão nessas estruturas é fundamental. As altas temperaturas, altas pressões, e longas distâncias entre o ponto de monitoramento e o ponto de leitura dos dados na superfície, são pontos críticos para o monitoramento da corrosão utilizando sensores mecânicos, eletrônicos ou eletromagnéticos. Por outro lado, os sensores à base de fibra óptica são ideais para aplicações em poços de petróleo

Figura 1 – Distribuição dos sensores multiparâmetros de fibra óptica para o monitoramento simultâneo de temperatura, índice de refração e corrosão nos dutos de poços de petróleo. As cabeças sensoras são representadas por pontos pretos ao longo dos dutos.



Fonte: Adaptado de Chris Staveley (2014) (STAVELEY,).

devido a sua capacidade de realizar medidas à longas distâncias, em ambientes hostis, e sem interrupção da produção. Há também a possibilidade de realizar medições ao longo de vários pontos ou de forma distribuída, como é o caso do sensor apresentado nesta Tese de Doutorado, que possibilita monitorar a temperatura em todo o link sensor, o índice de refração e a corrosão ao longo de vários pontos discretos. Desse modo, a temperatura, o índice de refração e a corrosão podem ser monitorados na extensão dos dutos de poços de petróleo.

1.2 ORGANIZAÇÃO DA TESE DE DOUTORADO

Esta Tese de Doutorado está organizada em sete capítulos, em que o Capítulo 1 é esta introdução. O Capítulo 2 apresenta os mecanismos de detecção multiparâmetro, fornecendo a fundamentação teórica essencial para os sensores propostos. Nele, são abordados os princípios e conceitos fundamentais relacionados à tecnologia de sensoriamento. Além disso, o capítulo explora detalhadamente a técnica de interrogação adotada pelo sistema proposto, suas estruturas fundamentais e as equações importantes utilizadas na obtenção dos resultados finais. Com isso, busca-se proporcionar ao leitor uma compreensão sólida das bases teóricas subjacentes aos sensores em questão e prepará-lo para a análise e interpretação dos resultados apresentados

posteriormente.

O Capítulo 3 apresenta uma abordagem geral sobre sensores de fibra óptica e três revisões de literatura abordando sensores de fibra óptica. A primeira revisão destacada uma ampla gama de sistemas de monitoramento, desde as primeiras propostas que envolviam configurações simples e poucos componentes para a detecção distribuída da temperatura baseado em Raman, até os esquemas mais robustos e avançados utilizados atualmente, que incorporam diversos recursos adicionais. O capítulo também aborda as aplicações desses sensores e acompanha sua evolução ao longo de quase quatro décadas de desenvolvimento. Além disso, são discutidos os desafios e as oportunidades para o avanço das tecnologias de sensores de temperatura distribuídos baseados no Efeito Raman, com ênfase no estado atual da pesquisa. A segunda revisão se concentra nos sensores de fibra óptica para detecção de corrosão, explorando diversas estruturas de elemento sensores, incluindo as que são baseadas em fibra óptica metalizadas, abordando diversas características desses sensores. Uma das principais características discutidas é a capacidade desses sensores de fornecer informações sobre a taxa de corrosão. A terceira revisão trata dos sensores multiparâmetro de fibra óptica, abordando uma variedade de sistemas de detecção por fibra óptica capazes de monitorar duas ou mais grandezas simultaneamente, sendo a temperatura um parâmetro obrigatório. Essa abordagem é organizada com base nos princípios de operação envolvidos na detecção multiparâmetro e nas combinações de diferentes parâmetros que podem ser medidos simultaneamente. São apresentados os princípios de operação dos sensores multiparâmetro e são discutidos exemplos de combinações de parâmetros que podem ser monitorados de forma simultânea.

O Capítulo 4 apresenta os resultados experimentais do sensor distribuído de temperatura baseado em retroespalhamento Raman, que representam uma das contribuições desta Tese de Doutorado. Os resultados são apresentados para a avaliação do sensor em uma ampla faixa de temperatura e operações em distâncias de até 27 km. A configuração experimental implementada é destacada e discutida em detalhes, descrevendo os componentes e as técnicas utilizadas para a obtenção dos resultados. O desempenho do sensor distribuído de temperatura baseado na reflectometria óptica Raman anti-Stokes no domínio do tempo é caracterizado por diversas figuras de mérito, como sensibilidade, acurácia, resolução, alcance e tempo de medida. Essas figuras de mérito são discutidas em relação aos resultados experimentais obtidos, fornecendo uma análise abrangente do desempenho do sensor.

O Capítulo 5 apresenta os resultados experimentais de um novo sistema de sensor de fibra óptica multiparâmetro baseado na reflectometria óptica Raman anti-Stokes no domínio do tempo, utilizando a arquitetura descrita no Capítulo 5. Esse sistema permite monitorar simultaneamente a temperatura, a corrosão e o índice de refração de forma distribuída em múltiplos pontos. São fornecidos detalhes e discussões sobre a configuração experimental utilizada, incluindo os componentes, técnicas de medição e procedimentos adotados. Os resultados alcançados são analisados e discutidos, tanto em relação ao monitoramento individual de cada parâmetro quanto

à operação integrada dos sensores. Embora os sensores funcionem de forma independente, eles estão conectados em um único link de fibra óptica, permitindo obter múltiplas informações por meio de um único sistema. A operação do sensor é avaliada em diferentes condições de teste, como variações de temperatura, níveis de corrosão e mudanças no índice de refração. São avaliados tanto o desempenho individual de cada sensor quanto as interações entre as grandezas monitoradas quando integradas em um único sistema.

Por fim, o Capítulo 6 apresenta reflexões sobre as contribuições desta Tese de Doutorado. São discutidos como os resultados alcançados contribuem para o avanço do conhecimento na área de sensores ópticos. Além disso, são apresentadas perspectivas para trabalhos futuros, identificando pontos que podem ser explorados para aprimorar ainda mais o sistema de sensor desenvolvido.

2 PRINCÍPIO DE DETECÇÃO

Este capítulo visa fornecer a fundamentação teórica para os sensores propostos. Serão discutidos os princípios fundamentais e conceitos-chave relacionados à tecnologia de sensoriamento. A compreensão destes fundamentos é essencial para o entendimento do funcionamento e das aplicações do sensor, além de possibilitar uma identificação mais clara das melhorias e inovações apresentadas nesse trabalho. Na Seção 2.1, serão apresentados os fundamentos do espalhamento espontâneo de luz em fibras ópticas, onde conceitos e características principais desse fenômeno são discutidas. Em seguida, na Seção 2.2, será apresentada a técnica de interrogação adotada no sistema proposto, a qual utiliza a reflectometria óptica no domínio do tempo. Serão discutidos os princípios subjacentes a essa técnica, demonstrando como ela permite medir e analisar o comportamento da luz ao longo da fibra óptica. Na Seção 2.3 serão explorados os princípios de operação da termometria baseada em Raman, fornecendo informações sobre como a temperatura pode ser extraída através do espalhamento de luz em fibras ópticas. Na Seção 2.4, são apresentados os processos de monitoramento de corrosão para fibras ópticas com filme fino metálico. Por fim, a Seção 2.5 apresenta o princípio de monitoramento do índice de refração baseado na reflexão de Fresnel da luz anti-Stokes.

2.1 ESPALHAMENTO DE LUZ EM FIBRAS ÓPTICAS

Quando uma luz incide sobre um material, ocorre a interação e a subsequente transferência de energia entre os fótons da luz incidente e as espécies atômicas ou moleculares constituintes desse material (HEADLEY; AGRAWAL, 2005; AGRAWAL, 2001). Dentre os muitos fenômenos originados nessa interação, tem-se o espalhamento de luz. No caso da fibra óptica, que é um meio não homogêneo, os processos de espalhamento de luz são ocasionados por pequenas variações de densidade, pelo arranjo arbitrário das moléculas e pela presença de dopantes no material que constitui a fibra (Ikushima, 2000; Silva, 2022). Existem dois tipos de espalhamento de luz que podem ocorrer nas fibras ópticas: o espalhamento elástico e o espalhamento inelástico (DATTA; SANKAR; SRINIVASAN, 2022). A classificação quanto ao tipo de espalhamento é fundamentada na relação entre as frequências dos fótons incidentes e dispersos (DATTA; SANKAR; SRINIVASAN, 2022).

O espalhamento elástico ocorre quando a frequência do fóton secundário (fóton espalhado) é a mesma que a frequência do fóton primário (fóton incidente). Nesse caso, há

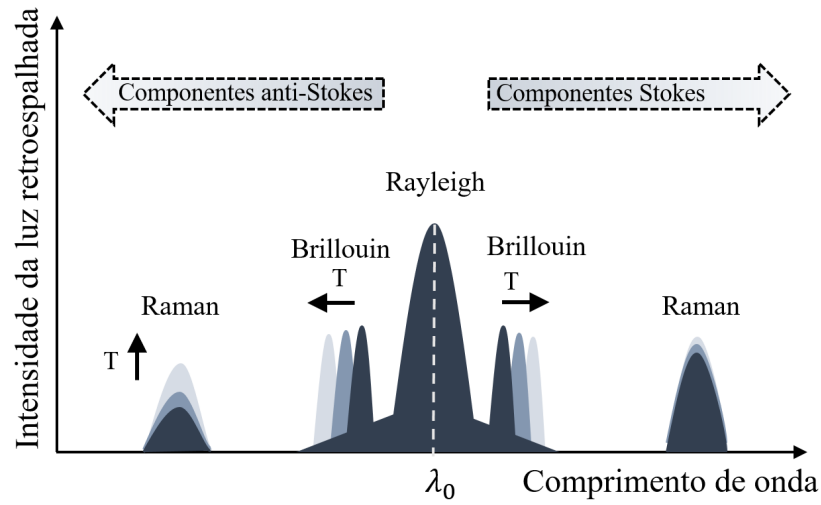
conservação da energia e do momento durante a interação. Em essência, não ocorre uma transferência líquida de energia entre os fótons primários e secundários. Por outro lado, o espalhamento inelástico ocorre quando as frequências dos fótons primários e secundários são diferentes. Nesse caso, ocorre uma troca líquida de energia entre os fótons, resultando em uma mudança na energia do fóton espalhado em relação ao fóton incidente. Assim, a radiação espalhada nas fibras ópticas possui características espectrais diferentes (INAUDI; GLISIC, 2006). Uma ilustração do espectro de comprimento de onda da luz espalhada em fibras ópticas quando um sinal de comprimento de onda único é propagado é apresentada na Figura 2.

O espalhamento Rayleigh é causado pelo espalhamento elástico da luz, resultando no mesmo comprimento de onda e frequência da radiação da onda de luz incidente, como pode ser observado na Figura 2. Essa forma de espalhamento é ocasionada por variações microscópicas localizadas de densidade que resultam em flutuações aleatórias no índice de refração (AGRAWAL, 2012). A amplitude da radiação retroespalhada de Rayleigh em fibras não é afetada pela tensão mecânica ou pelas mudanças de temperatura do meio. No entanto, a fase da luz retroespalhada de Rayleigh é altamente sensível a perturbações externas, como tensão mecânica, vibração e temperatura. É importante ressaltar que essa descrição se aplica de maneira apropriada às fibras ópticas. Para meios gasosos, é válido notar que a intensidade de espalhamento Rayleigh está inversamente relacionada à temperatura (AGRAWAL, 2000).

A radiação dispersa com deslocamento de frequência em relação à radiação incidente está associada ao espalhamento Raman e ao espalhamento Brillouin. Esses componentes espectrais surgem das interações entre os fótons da luz incidente e os fônons, resultando em duas bandas igualmente espaçadas em frequência em relação à banda principal. No contexto das fibras ópticas, a diferença de frequência é de aproximadamente 13 THz para o espalhamento Raman e cerca de 11 GHz para o espalhamento Brillouin. Em ambos os casos, a banda de menor frequência é conhecida como banda de Stokes, enquanto a banda de maior frequência é chamada de banda anti-Stokes.

O espalhamento Brillouin é um fenômeno de dispersão inelástica no qual a radiação incidente é espalhada por fônons acústicos presentes no material (DATTA; SANKAR; SRINIVASAN, 2022). Durante o espalhamento Brillouin, a onda de luz retroespalhada interage com a onda incidente, resultando na formação de um padrão de onda estacionária. Essa formação ocorre devido à interferência construtiva e destrutiva entre as duas ondas. Como resultado, observam-se variações periódicas de densidade no meio onde o espalhamento Brillouin ocorre (DATTA; SANKAR; SRINIVASAN, 2022). Essas variações de densidade produzem uma modulação periódica da constante dielétrica e, conseqüentemente, do índice de refração do meio (MAUGHAN; KEE; NEWSON, 2001b). Devido à baixa energia dos fônons acústicos em comparação com a onda óptica, ocorre uma mudança de frequência muito pequena no espalhamento de Brillouin (DATTA; SANKAR; SRINIVASAN, 2022). Essa mudança de

Figura 2 – Espectro de espalhamento Rayleigh, Brillouin e Raman em fibra óptica.



Fonte: adaptado de Cibula, Donlagic (2007)

frequência é dada por (MAUGHAN; KEE; NEWSON, 2001b):

$$f_B = \frac{2nv_s}{\lambda_0}, \quad (1)$$

em que n é índice de refração do meio, v_s é a velocidade da onda sonora que se propaga na fibra e λ_0 é o comprimento de onda da luz incidente. Devido à dependência da frequência Brillouin com o índice de refração e a velocidade da onda sonora, que por sua vez são sensíveis à temperatura e tensão mecânica do meio, essas características podem ser exploradas para o desenvolvimento de sensores de temperatura e tensão mecânica baseados em Brillouin. A Figura 2 ilustra como as componentes do espalhamento Brillouin são moduladas pela temperatura do meio.

Nos sensores de temperatura baseados em Brillouin, o monitoramento da temperatura é realizado no domínio da frequência e, por isso, são menos sensíveis a flutuações na potência de entrada, onde tem implicações diretas na precisão da medida. Entretanto, a aplicação dessa técnica requer um tempo de interação prolongado para varrer a diferença de frequências ópticas, o que limita sua adequação para medidas rápidas (BAO; ZHOU; WANG, 2021). Além disso, esses sensores comumente requerem abordagens mais complexas e equipamentos experimentais de maior porte, em comparação com outros sensores, como os sensores baseados em Raman. Na literatura, encontram-se diversos estudos que tratam de sensores de temperatura que utilizam o efeito Brillouin (MAUGHAN; KEE; NEWSON, 2001a; MAUGHAN; KEE; NEWSON, 2001b; SELKER et al., 2006; CUSCINÀ, 2019; YU; LIU; Z, 2006; SONG et al., 2020; HUANG; FAN; HE, 2022)

O espalhamento Raman também é um fenômeno de espalhamento inelástico e, portanto, as componentes originadas nesse processo têm características espectrais diferentes da luz

incidente. Durante o espalhamento da luz em uma fibra óptica, ocorre interação entre a luz incidente e as vibrações moleculares do material. Esse processo resulta na formação de duas novas componentes, conhecidas como Stokes e anti-Stokes, que estão igualmente espaçadas em frequência em relação ao sinal principal.

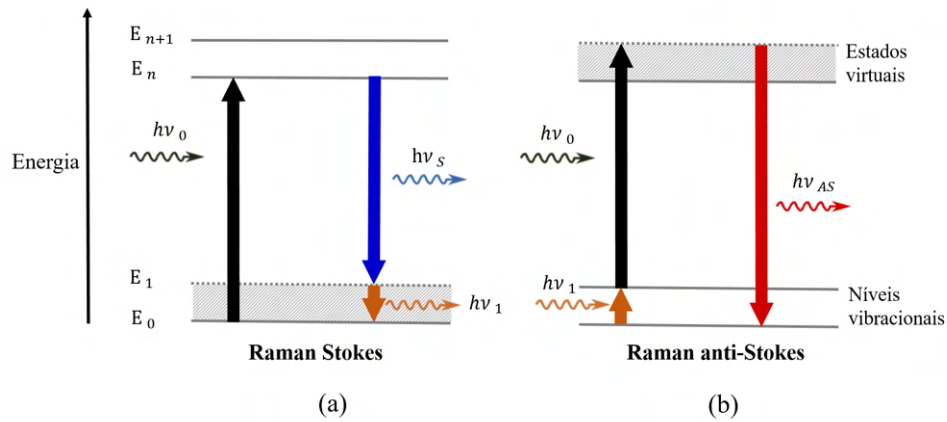
Enquanto no espalhamento Brillouin a interação ocorre entre fótons da luz incidente e fônons acústicos, no espalhamento Raman os modos vibracionais estão associados fundamentalmente aos modos de fônon óptico do sistema molecular (DATTA; SANKAR; SRINIVASAN, 2022). Essencialmente, no espalhamento Raman, ocorre um processo fundamental conhecido como conversão de energia ou transferência de energia entre fótons. Essa conversão envolve a transformação de um fóton incidente em um fóton de energia menor, chamado de anti-Stokes, ou a transformação de um fóton incidente em um fóton de energia maior, chamado de Stokes, onde a diferença de energia corresponde à de um fônon óptico. No caso do anti-Stokes, a energia do fóton incidente é transferida para o material durante o processo de espalhamento. Isso resulta na emissão de um fóton com energia reduzida em comparação ao fóton incidente. Essa redução de energia ocorre porque parte da energia do fóton incidente é absorvida pelo material, geralmente através de excitações vibracionais (resultantes do aumento da temperatura, por exemplo) (AGRAWAL, 2012). O fóton anti-Stokes resultante possui, portanto, uma frequência menor que a do fóton incidente. Por outro lado, no processo de Stokes, a energia do fóton incidente é aumentada durante a interação com o material. Isso ocorre quando o material absorve energia adicional do ambiente ou quando ocorre um processo de estimulação Raman (AGRAWAL, 2012). Como resultado, um fóton com energia maior do que o fóton incidente é emitido. O fóton Stokes possui uma frequência maior que a do fóton incidente. Uma compreensão mais abrangente desse processo e das transições energéticas envolvidas pode ser alcançada observando o diagrama de nível de energia do processo de espalhamento Raman espontâneo ilustrado na Figura 3.

No espalhamento Raman Stokes, o sistema é impulsionado do seu estado fundamental de energia (E_0) para um estado de energia mais elevada (E_n) devido à absorção de um fóton de alta energia ($h\nu_0$), que comumente é fornecido por uma fonte de luz intensa, como um laser. Durante a excitação, ocorre a elevação da energia de um elétron dentro do sistema. Após essa excitação, o elétron relaxa para um estado de energia inferior, frequentemente o estado fundamental, liberando a energia extra sob a forma de um fóton de menor energia, conhecido como fóton Stokes. Ou seja, as moléculas do material emitem a energia remanescente por meio de uma transição não radiativa do estado vibracional excitado E_1 para o estado E_0 . Essa transição entre os níveis vibracionais é acompanhada pela emissão de um fônon de energia $h\nu_1$.

No processo de espalhamento anti-Stokes, o sistema captura um fóton proveniente da fonte ($h\nu_0$) e um fônon da rede ($h\nu_1$), resultando na emissão de um fóton anti-Stokes de maior frequência e energia $h\nu_{AS}$.

Assim, pelo princípio de conservação de energia, as energias dos fótons Stokes e anti-

Figura 3 – Diagrama de nível de energia do espalhamento Raman espontâneo.



Fonte: o autor, 2023

Stokes são, respectivamente (SINGH; SINGH, 2007):

$$h\nu_S = h\nu_0 - h\nu_1, \quad (2)$$

$$h\nu_{AS} = h\nu_1 + h\nu_0, \quad (3)$$

A diferença de intensidade entre a onda de Stokes e a onda de anti-Stokes é notável, com a intensidade da primeira sendo várias ordens de grandeza maior. Isso deve-se ao fato de que o fenômeno Raman Stokes é muito mais provável de ocorrer em comparação com o Raman anti-Stokes. Essa preferência pode ser atribuída à menor probabilidade de encontrar moléculas em estados excitados, em comparação com o estado fundamental de energia. A energia adicional necessária para alcançar os estados excitados faz com que sua ocupação seja menos comum. Na fibra de sílica fundida, a proporção entre o espalhamento de Stokes e o espalhamento de anti-Stokes é da ordem de 1 em 10^7 fótons (DATTA; SANKAR; SRINIVASAN, 2022).

Além disso, a quantidade de radiação incidente que é espalhada após penetrar 1 cm em um meio dispersor é extremamente pequena, representando apenas cerca de 10^{-6} do total (SAUTER, 1996). Essa baixa taxa de espalhamento resulta em intensidades típicas do sinal Raman anti-Stokes sendo consideravelmente mais baixas (SAUTER, 1996). Portanto, a combinação de uma menor probabilidade de ocupação de estados excitados e a baixa intensidade do sinal anti-Stokes contribuem para a predominância do fenômeno Raman Stokes.

A estrutura amorfa da sílica fundida implica que os átomos não estão organizados em uma rede cristalina regular, o que leva a variações nas distâncias e ângulos de ligação ao longo da fibra. Essa falta de ordem estrutural contribui para a existência de uma ampla gama de configurações vibracionais possíveis para as moléculas de sílica. Consequentemente, o espectro de ganho Raman nas fibras ópticas exibe vários picos distintos, correspondendo às transições

vibacionais permitidas entre os diferentes níveis de energia. O ganho máximo ocorre quando a mudança de frequência (diferença de frequência entre a luz incidente e os componentes Stokes e anti-Stokes) é de cerca 13 THz (DATTA; SANKAR; SRINIVASAN, 2022). Essa separação entre os espectros de espalhamento Stokes e anti-Stokes é particularmente interessante para aplicações em sensores baseados em Raman porque ela permite a detecção e análise precisa das informações vibracionais das moléculas do material analisado (SILVA; SEGATTO; CASTELLANI, 2022).

A variação da frequência dos sinais de Stokes e anti-Stokes gerados pelo espalhamento Raman depende da fonte de luz e do meio em que ocorre, conforme mencionado anteriormente. Essa alteração de frequência pode ser determinada utilizando equações específicas para o sinal Stokes (λ_S) e anti-Stokes (λ_{AS}), quando o comprimento de onda (λ_0) da fonte de luz é conhecido (em metros) e o deslocamento de frequência ($\Delta\nu$) é expresso em unidades de inverso de comprimento (cm^{-1}) (SILVA; SEGATTO; CASTELLANI, 2022):

$$\lambda_S = \frac{0,01}{\frac{0,01}{\lambda_0} - \Delta\nu} \quad (4)$$

$$\lambda_{AS} = \frac{0,01}{\frac{0,01}{\lambda_0} + \Delta\nu} \quad (5)$$

O valor 0,01 é usado como fator de conversão de unidades específica usada para transformar o deslocamento de frequência ($\Delta\nu$) de unidades de inverso de comprimento (cm^{-1}) para comprimento de onda (λ) em metros. Essas equações são úteis para determinar a variação das frequências de espalhamento Raman em relação à fonte de luz e ao meio em que ocorrem, facilitando a análise e interpretação dos espectros Raman. No sistema proposto neste trabalho, as mudanças de comprimento de onda correspondentes a um deslocamento na frequência de $400\text{ }cm^{-1}$ são aproximadamente 100 nm, considerando que a fonte de luz opera a 1550 nm.

A detecção de temperatura utilizando o espalhamento Raman em fibras ópticas apresenta-se como uma opção atrativa. Isso se deve ao fato de que a densidade dos fônons acústicos varia conforme a temperatura do material, permitindo que a intensidade do espalhamento anti-Stokes seja utilizada como uma medida confiável da temperatura em cada ponto da fibra (DATTA et al., 2021). Por outro lado, a intensidade do espalhamento de Stokes apresenta uma dependência fraca em relação à temperatura (DATTA et al., 2021). Além disso, em fibras ópticas de sílica-germânio, à temperatura ambiente, observa-se que a sensibilidade da intensidade em relação à temperatura é significativamente diferente para o sinal anti-Stokes e o sinal Stokes. A sensibilidade da intensidade do sinal anti-Stokes em relação à temperatura é de aproximadamente 0,8 % por Kelvin, enquanto para o sinal Stokes é de apenas 0,1 % por Kelvin (K^{-1}) (BOLOGNINI; HARTOG, 2013). Essa notável dependência da temperatura do sinal anti-Stokes torna possível a implementação de sensores distribuídos de temperatura baseados em espalhamento Raman (SDT-R) (DAKIN, 1993).

Comumente, os sistemas de detecção baseados em Raman utilizam a componente anti-

Stokes para a obtenção da informação de temperatura e o sinal Stokes para a correção do efeito de atenuação diferencial e de outros efeitos. No entanto, a medida de temperatura pode ser alcançada exclusivamente pela detecção do sinal anti-Stokes, que é fortemente sensível a temperatura. A detecção distribuída de temperatura é realizada através da combinação do princípio do espalhamento Raman com a técnica de reflectometria óptica no domínio do tempo (OTDR) (BOLOGNINI; HARTOG, 2013).

É importante ressaltar que, embora o espalhamento Raman envolva processos não lineares relacionados à mudança de frequência da luz espalhada, a maioria dos sensores de temperatura baseados em Raman utiliza o efeito Raman espontâneo, que é linear no sentido de que o espalhamento é proporcional à intensidade da fonte de luz (SILVA; SEGATTO; CASTELLANI, 2022). Embora o efeito Raman estimulado também exista, ele não é comumente empregado como mecanismo de detecção devido às limitações significativas que impõe a esses sistemas (SILVA; SEGATTO; CASTELLANI, 2022). No presente trabalho, utiliza-se o espalhamento Raman espontâneo em fibra óptica para a detecção distribuída de temperatura, índice de refração e corrosão.

2.2 REFLECTOMETRIA ÓPTICA NO DOMÍNIO DO TEMPO

A reflectometria óptica óptica no domínio do tempo (OTDR- Optical Time-Domain Reflectometry) é uma técnica amplamente utilizada para caracterizar dispositivos e sistemas ópticos (SHADARAM, 1984). Atualmente, a OTDR é um dos métodos mais eficientes para a análise de sistema por fibra óptica e tornou-se indispensável na caracterização desses sistemas (RIBEIRO, 2007). 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).

Na OTDR, pulsos de curta duração são enviado ao longo de uma fibra óptica, e observam-se os sinais ópticos retroespalhados pela fibra. Esses pulsos são lançado em um extremidade da fibra, e têm duração e amplitudes bem definidas (RIBEIRO, 1999). Os sinais refletidos podem ser originadas pela reflexão de Fresnel e pelo espalhamento Rayleigh, e carregam informações características da fibra, tais como perda da potência óptica, pontos com defeitos, emendas, conectores e outros. 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, e, assim, determinar a localização exata de irregularidades (RIBEIRO, 1999). Essa técnica é amplamente utilizada para monitoramento de sistemas ópticos de longas distâncias, uma vez que a análise do enlace óptico é feita no domínio do tempo, de modo que conhecendo o tempo de propagação do pulso, torna-se possível determinar a posição da falha. Além disso, a análise é feita pela comparação entre o sinal espalhado e o sinal de teste fornece uma série de informações sobre o meio de transmissão

(SENIOR; JAMRO, 2009). Além de ser um método não destrutivo, isto é, não necessita cortes na fibra óptica, a reflectometria óptica no domínio do tempo requer acesso apenas a uma das extremidades do sistema óptico (SENIOR; JAMRO, 2009). Essas características tornam a técnica OTDR interessante para aplicações em sistemas de sensoriamento (BOLOGNINI; HARTOG, 2013). Na OTDR, quando um pulso de curta duração em τ e energia E_0 é emitido na entrada da fibra, a potência óptica P_S do sinal retroespalhado em função da posição z ao longo da fibra de comprimento L , pode ser dada por (BOLOGNINI; HARTOG, 2013):

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

Na Equação 6, P_0 corresponde à potência incidente na entrada da fibra ($z = 0$), calculada como $P_0 = E_0/\tau$. O fator de captura é representado por S , e está relacionado à fração da luz espalhada que é capturada pela fibra óptica, e guiada em sentido contra-propagante, onde está relacionado ao tipo de fibra óptica utilizada. Os coeficientes de espalhamento Rayleigh e de atenuação são representados por α_s e α , respectivamente. O parâmetro z indica a posição de referência na fibra óptica. O coeficiente de espalhamento α_s também desempenha um papel relevante, sendo relacionado ao estado da fibra óptica. Alterações externas localizadas podem ser identificadas ao explorar esse fator, o que permite detectar e monitorar eventos ou perturbações na fibra (YIN; RUFFIN, 2002; BOLOGNINI; HARTOG, 2013).

A posição z , onde a luz foi espalhada, pode ser determinada conhecendo o intervalo de tempo Δt , entre a emissão do pulso e a detecção do sinal refletido, uma vez que a velocidade de propagação da luz no vácuo, c , e o índice de refração do núcleo da fibra, n , são quantidades precisamente estabelecidas. Isso pode ser expresso considerando a relação entre a distância percorrida pela luz e o tempo através da Equação (ROSSETTO et al., 2004):

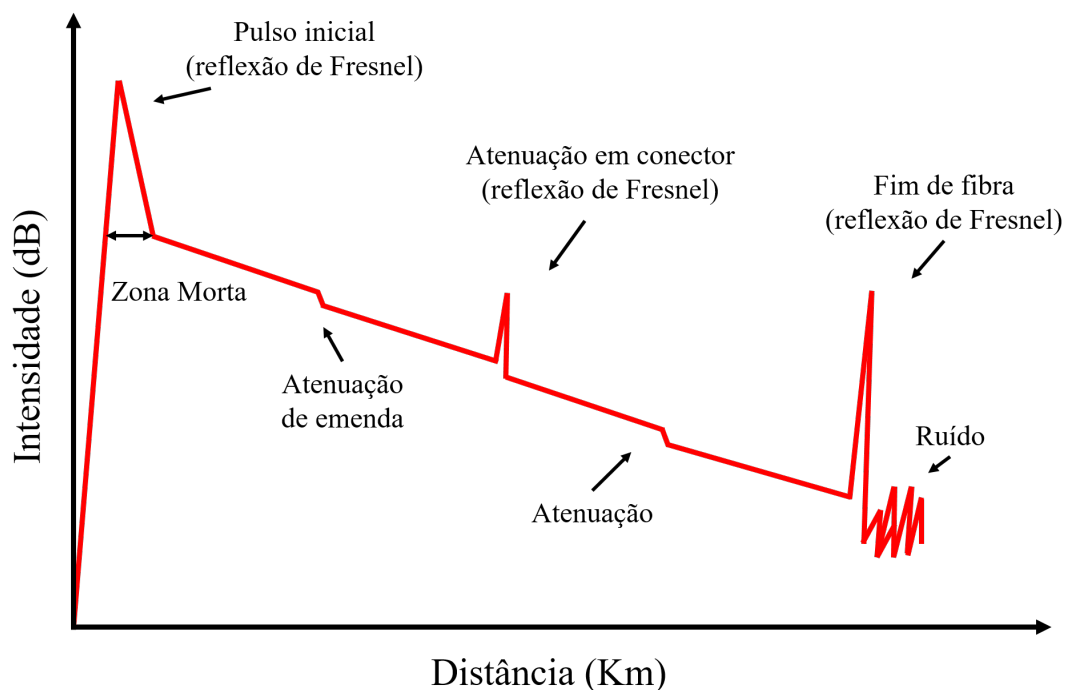
$$z = \frac{c}{2n}.\Delta t = \frac{v_g}{2}\Delta t. \quad (7)$$

Ou, como alternativa, é possível descrever a posição z com base na velocidade de grupo v_g e no intervalo de tempo Δt .

Como resultado final da técnica OTDR, obtêm-se uma curva da intensidade do sinal óptico ao longo de todo comprimento da fibra. Esse resultado fornece a distribuição espacial dos eventos na fibra óptica sob teste. A Figura 4 exibe o traço típico obtido por um equipamento OTDR (OTDR - Optical Time-Domain Reflectometer). Pode-se observar na Figura 4 as variações de intensidade do sinal retroespalhado ao longo da fibra, perdas de propagação e atenuação de emenda. Além disso, são destacados os pontos em que ocorrem reflexão de Fresnel, que podem ser geradas pelo acoplamento da fonte de luz à fibra óptica, conectores, emendas e no fim de fibra (interface fibra/meio externo). Desse modo, efeitos de diferentes naturezas, que inserem perdas ou reflexões ao enlace óptico, podem ser monitoradas por um OTDR, desde que gerem alterações na intensidade do sinal retroespalhado que possam ser detectadas pelo equipamento (SENIOR;

JAMRO, 2009). É relevante destacar que a técnica OTDR envolve uma série de processos até a obtenção dos resultados finais. Esses processos incluem amplificação, processamento digital de sinais, conversão analógico-digital e outros. Cada etapa desempenha um papel crucial para permitir a análise e interpretação dos sinais ópticos refletidos na fibra óptica.

Figura 4 – Traço OTDR típico da potência óptica em função da distância.



A técnica de reflectometria óptica no domínio do tempo é amplamente utilizada em sistemas de detecção distribuídos (BOLOGNINI; HARTOG, 2013). No contexto do monitoramento distribuído da temperatura baseado em Raman, a técnica OTDR é empregada para monitorar as variações de intensidade do sinal retroespalhado Raman anti-Stokes, que é modulado pelas alterações de temperatura em fibras ópticas. Em sistemas de monitoramento da corrosão em múltiplos pontos baseado em fibra metalizada, essa técnica pode ser aplicada para monitorar as reflexões geradas nas cabeças sensoras, devido à incidência da luz na interface fibra/metal, que é alterada pela reação corrosiva (MARTINS-FILHO et al., 2007). Além disso, a técnica OTDR também pode ser aplicada no monitoramento do índice de refração por meio de cabeças sensoras de face clivada. Nesse caso, a OTDR é utilizado para monitorar localmente os pontos onde ocorrem variações na intensidade de reflexão de Fresnel, às alterações do meio. Ao analisar as mudanças no índice de refração em uma região específica, a técnica OTDR pode detectar e registrar as variações na intensidade dos sinais refletidos na interface entre diferentes meios. Isso permite o monitoramento em tempo real das alterações locais no índice de refração, fornecendo informações valiosas sobre as propriedades do meio em estudo.

2.3 PRINCÍPIOS DE OPERAÇÃO DA TERMOMETRIA DISTRIBUÍDA BASEADA EM RAMAN

Quando a luz se propaga ao longo de uma fibra óptica, os parâmetros do campo de luz, como amplitude, frequência, fase e polarização da onda, podem sofrer modulação devido a perturbações externas à fibra. Essas modificações nos parâmetros ocorrem localmente na fibra em resposta a essas perturbações. Nos sistemas de detecção por fibra óptica, a detecção e monitoramento dessas alterações estão intimamente ligados ao fenômeno que está sendo analisado (YIN; RUFFIN, 2002). Ao estimular as mudanças no sinal de retroespalhamento, é possível medir ao longo da fibra sensora alguns parâmetros físicos, como tensão mecânica, temperatura, pressão e rotação, que são experimentados pelo meio. Essas mudanças nos parâmetros podem ocorrer individualmente ou simultaneamente. Portanto, a seleção do tipo de sensor é determinada pelas grandezas que se pretende medir, levando em consideração também a finalidade específica do sistema de detecção (LEE, 2003).

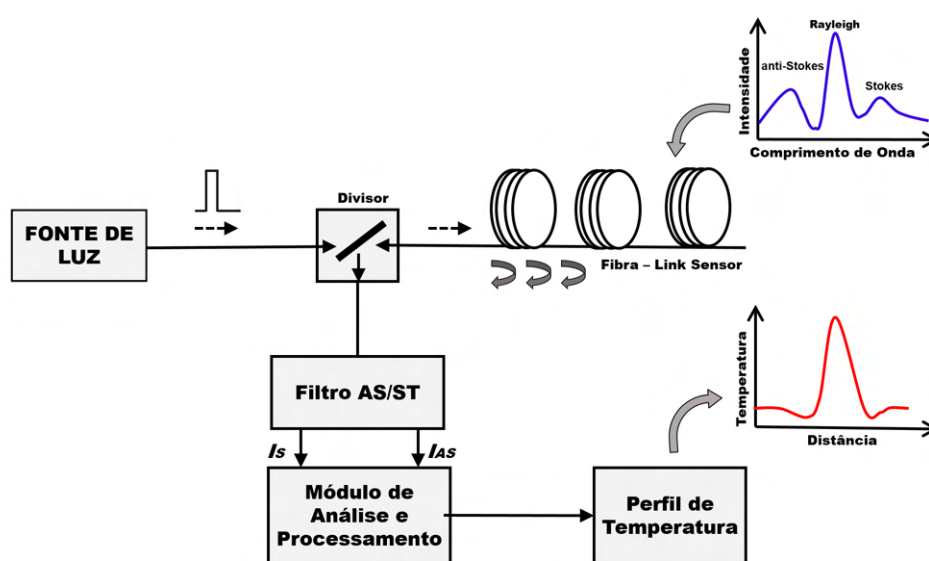
Os sistemas de detecção distribuídos de temperatura baseados em Raman são tecnologias de fibra óptica desenvolvidas para criar um perfil de temperatura ao longo de toda a extensão de uma fibra óptica. Mais precisamente, esse instrumento óptico utiliza a própria fibra óptica como sensor, dispensando a necessidade de dispositivos de detecção especializados. Essa abordagem emprega a detecção e o processamento do retroespalhamento Raman espontâneo, permitindo uma análise precisa e contínua das variações de temperatura em todo o enlace sensor.

A maioria dos sistemas de detecção de temperatura baseados em Raman utiliza a técnica de reflectometria óptica no domínio do tempo (OTDR) (BASSAN et al., 2016). Por meio do OTDR, é possível detectar os fótons contra-propagantes gerados pelo Espalhamento Raman e monitorar individualmente as intensidades dos campos retroespalhados Raman Stokes e anti-Stokes em diferentes distâncias ao longo da fibra óptica. À medida que a temperatura se altera em pontos externos à fibra, a intensidade do sinal anti-Stokes é modulada, fornecendo informações sobre os pontos em que ocorrem variações relacionadas à temperatura na curva OTDR.

A operação dos SDT-R é notavelmente simples, pois envolve principalmente o uso de uma fonte de luz pulsada acoplada à fibra sensora. A luz retroespalhada é então direcionada para um receptor óptico, onde a intensidade dessa luz é registrada em função do tempo, identificando as alterações de temperatura em cada ponto. A Figura 5 apresenta uma esquematização da estrutura básica dos SDT-R típicos. Nesse sistema em particular, uma fonte de luz, composta por um laser diodo, é utilizada para inserir pulsos de luz de curta duração em um link sensor de fibra óptica, por meio de um divisor direcional ou circulador óptico. A luz proveniente da fonte é modulada em amplitude. Esses pulsos luminosos provocam o espalhamento Raman espontâneo ao longo da fibra óptica, resultando na geração das componentes Raman Stokes e Raman anti-Stokes. Vale ressaltar que a banda anti-Stokes é especialmente influenciada pelas variações de temperatura do meio externo no qual a fibra está inserida. Os sinais retroespalhados, que se

propagam em sentido contrário aos pulsos luminosos, são direcionados pelo divisor para um filtro óptico, onde ocorre a separação dos sinais de interesse. No sinal recebido, estão presentes as componentes Rayleigh, Brillouin e Raman do espalhamento luminoso. Para uma identificação precisa, ou seja, separação eficiente das potências individuais dos campos Stokes e anti-Stokes, é necessário empregar filtros ópticos apropriados. Após a filtragem, os sinais são enviados para um módulo de análise e processamento, onde são monitorados no domínio do tempo e submetidos a etapas de processamento adicional. Ao final desse processo, os dados coletados são utilizados para a construção de um perfil de temperatura da fibra sensora, fornecendo informações valiosas sobre as variações térmicas do ambiente. Cada elemento representado na Figura 5 desempenha um papel crucial no resultado final. Em outras palavras, a seleção adequada dos parâmetros para cada elemento tem um impacto significativo no desempenho do sistema, ou seja, no erro de temperatura (precisão) e na resolução espacial. Portanto, é fundamental escolher os parâmetros apropriados para otimizar o desempenho global do sistema.

Figura 5 – Diagrama de blocos de um sistema Raman-OTDR típico.



A potência óptica do Raman anti-Stokes retroespalhado é tipicamente baixa, o que resulta em uma relação sinal-ruído (SNR - signal-to-noise ratio) reduzida (BASSAN et al., 2016). Para superar essa limitação e aprimorar o desempenho dos sistemas SDT-R, é comum adicionar módulos de amplificação óptica aos arranjos típicos desses sensores. Esses módulos se tornaram componentes essenciais da arquitetura básica do SDT-R, dada a restrição da potência da sonda devido ao surgimento de não linearidades causadas pelo espalhamento Raman estimulado. Além disso, em muitos casos são empregados mecanismos como técnicas de codificação para melhorar a SNR do sinal retroespalhado (BASSAN et al., 2015; BOLOGNINI et al., 2007). Com isso, busca-se aprimorar o alcance, a resolução e a faixa de operação dos sensores, atendendo às necessidades de aplicações modernas.

Nos sensores de temperatura baseados em Raman, as componente Stokes e anti-Stokes do espalhamento Raman são identificados individualmente para determinar a distribuição de temperatura do enlace sensor. Isso é possível porque as intensidades das componentes espalhadas Raman Stokes (I_S) e Raman anti-Stokes (I_{AS}) dependem da temperatura do meio. Essa dependência pode ser expressada por (BOLOGNINI; HARTOG, 2013):

$$I_S(T) = k_S \frac{1}{\exp\left(\frac{h\Delta\nu}{k_B T}\right) - 1} + 1, \quad (8)$$

$$I_{AS}(T) = k_{AS} \frac{1}{\exp\left(\frac{h\Delta\nu}{k_B T}\right) - 1}. \quad (9)$$

Na Equações 8 e 9, h e k_b representam as constantes de Planck e Boltzman, respectivamente, e $\Delta\nu$ indica deslocamento Raman da frequência, em Hertz. Os coeficientes k_S e k_{AS} são constantes que determinam a relação entre o comprimento de onda e a intensidade do espalhamento. Essas constantes podem ser determinadas fazendo uma calibração do sistema para uma temperatura conhecida em um ponto específico da fibra (BOLOGNINI; HARTOG, 2013)

O desenvolvimento de sensores distribuídos de temperatura baseados no Efeito Raman aproveita as características singulares do sinal anti-Stokes. No contexto da fibras ópticas, esse sinal apresenta uma sensibilidade à temperatura cerca de oito vezes maior, por unidade de temperatura, em comparação ao sinal Stokes. Essa significativa dependência do sinal anti-Stokes em relação à temperatura possibilita a implementação de sistemas de monitoramento de temperatura ao longo da fibra óptica.

Se as intensidades dos sinais retroespalhados Raman anti-Stokes e Stokes forem monitoradas individualmente, a temperatura absoluta (T) em cada ponto da fibra pode ser calculada pela razão entre a intensidade das componentes retroespalhadas anti-Stokes e Stokes (I_{AS}/I_S), conforme expressão (DAKIN et al., 1985a):

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

$$T = \left[\frac{1}{T'} - \frac{k_B}{h\Delta\nu} \left(\frac{R(T)}{R(T')} \right) \right], \quad (11)$$

onde $R(T')$ e $R(T)$ representam as taxas de retroespalhamento calculadas na seção de fibra de referência e na seção arbitrária, respectivamente.

As Equações 10 e 11 são tidas como interessantes, pois independem de parâmetros, como energia do pulso, comprimento de onda da fonte, das alterações do sinal transmitido ao longo da propagação na fibra e da fração de captura dos sinais. Por outro lado, essas expressões não consideram a atenuação diferencial do anti-Stokes e Stokes. Esse parâmetro surge porque os espalhamentos anti-Stokes e Stokes de Raman possuem comprimentos de onda distintos e são

atenuados de forma diferente ao longo da fibra (SILVA; SEGATTO; CASTELLANI, 2022). Em particular, em fibras ópticas de comprimentos consideráveis, essa perda diferencial não pode ser negligenciada. Consequentemente, é crucial realizar correções nas potências ópticas dos campos Stokes e anti-Stokes antes de aplicar a Equação 10 para evitar erros de medição, e para garantir uma medida precisa e confiável da temperatura (DAKIN, 1993).

A potência óptica incidente no detector do sinal retroespalhado anti-Stokes e Stokes na distância z , onde z representa a distância ao longo da qual o espalhamento ocorre, pode ser expressa como (BOLOGNINI; HARTOG, 2013):

$$P_{AS} = E_0 \cdot \eta_{AS}(z) \cdot \exp \left(- \int_0^z (\alpha(\xi) + \alpha_{AS}(\xi)) d\xi \right), \quad (12)$$

$$P_S(z) = E_0 \cdot \eta_S(z) \cdot \exp \left(- \int_0^z (\alpha(\xi) + \alpha_S(\xi)) d\xi \right), \quad (13)$$

em que $E_0 = P_0 \cdot t$ representa a energia do sinal de bombeio, que é o produto de sua potência P_0 na entrada da fibra ($z=0$) e sua duração t . O fator de retroespalhamento local no local z é indicado por $\xi(z)$, e α_{AS} e α_S são os coeficientes atenuação na fibra das ondas anti-Stokes e Stokes, respectivamente.

Ao levar em consideração as perdas de propagação em fibras ópticas, a distribuição de temperatura, representada pela razão entre as intensidades dos sinais retroespalhados anti-Stokes e Stokes, é obtida a partir da relação entre $P_{AS}(z)$ e $P_S(z)$. Dessa forma, $R(T, z)$ é expresso como (BOLOGNINI; HARTOG, 2013):

$$R(T) = \frac{I_{AS}}{I_S} = \left(\frac{\lambda_{AS}}{\lambda_S} \right)^4 \exp \left(- \frac{h\Delta\nu}{k_B T} \right) \cdot \exp \left(- \int_0^z (\alpha_{AS}(\xi) + \alpha_S(\xi)) d\xi \right). \quad (14)$$

Assim, a Equação 10 pode ser empregada com a adição de um termo exponencial, levando em conta as atenuações sofridas pelas componentes do espalhamento Raman, tal qual na Equação 14.

Embora a razão entre as intensidades dos sinais retroespalhados anti-Stokes e Stokes possa fornecer uma medida direta da temperatura, outras abordagens têm ganhado destaque na termometria baseada em Raman. Uma dessas abordagens é a determinação da temperatura a partir da razão entre as intensidades dos sinais retroespalhados anti-Stokes e Rayleigh.

A distribuição de temperatura também pode ser obtida através de uma calibração de temperatura, utilizando exclusivamente o sinal Raman anti-Stokes (BOLOGNINI; HARTOG, 2013; BASSAN et al., 2015). Nesse processo, a intensidade do sinal retroespalhado Raman anti-Stokes é medida ao longo da fibra óptica, para diferentes temperaturas controladas e conhecidas. Para isso, pode-se utilizar um termômetro em regiões específicas da fibra sensora para criar variações de temperatura controladas. A partir das intensidades medidas do sinal Raman anti-

Stokes, é possível estabelecer uma relação entre a intensidade e a temperatura ambiente através de uma expressão matemática .

Com base nessa relação, é possível obter o perfil de temperatura ao longo da fibra, determinando a temperatura em pontos desconhecidos a partir das intensidades do sinal Raman anti-Stokes. Além disso, é comum utilizar uma curva de referência para a temperatura ambiente, que permite normalizar o sinal medido, e obter uma medida precisa da temperatura em relação a essa referência.

O uso exclusivo do sinal anti-Stokes em sensores de temperatura baseados no Efeito Raman oferece algumas vantagens significativas (BOLOGNINI; HARTOG, 2013; DATTA; SANKAR; SRINIVASAN, 2022; BASSAN et al., 2015; SOTO et al., 2011): (i) sensibilidade aprimorada: detecção de pequenas variações de temperatura com maior precisão e resolução é possível usando apenas o sinal anti-Stokes; (ii) redução de interferências: ao utilizar exclusivamente o sinal anti-Stokes, possíveis interferências ou ruídos provenientes do sinal Stokes e chaveamentos são eliminados, resultando em medidas de temperatura mais confiáveis e precisas; (iii) simplicidade do sistema: a utilização exclusiva do sinal anti-Stokes simplifica o sistema de medição de temperatura, exigindo menos componentes ópticos e processamento de sinais. Isso pode levar a uma implementação mais simples e de menor custo; (iv) menor dependência de parâmetros: O uso exclusivo do sinal anti-Stokes reduz a dependência de parâmetros críticos, como a potência do sinal de bombeio, que pode ser aumentada para um valor mais próximo do regime não linear, e a perda de propagação da fibra óptica.

O desempenho dos sensores distribuídos de temperatura baseados em Raman é determinado pela resolução de temperatura, resolução espacial, alcance e tempo de resposta (tempo de medição).

A capacidade do sensor em distinguir pequenas variações na temperatura medida determina a resolução de temperatura do sensor (SILVA; SEGATTO; CASTELLANI, 2022). A resolução espacial do sensor é determinada pela sua capacidade de identificar eventos em pontos adjacentes. Contudo, tanto a resolução de temperatura quanto a resolução espacial são impactadas pelo comprimento da fibra, uma vez que o sinal medido se atenua à medida que a distância aumenta. Esta limitação está intrinsecamente ligada ao alcance de detecção, pois o sinal medido se atenua com o aumento da distância. Isso, por sua vez, resulta na degradação da relação sinal-ruído (SNR) e, conseqüentemente, na diminuição da resolução de temperatura. Por outro lado, é possível melhorar a resolução espacial reduzindo a largura do pulso, embora isso implique na redução da potência óptica do pulso transmitido. Como resultado, o sinal retroespalhado detectado se torna mais suscetível a ruídos.

O tempo de medição do sensor se refere ao período necessário para que o sensor realize medições em todos os pontos da fibra óptica, com o objetivo de alcançar a precisão de medida declarada (DATTA; SANKAR; SRINIVASAN, 2022). Para melhorar a relação sinal-ruído (SNR), é comum aplicar um número significativo de médias em sistemas SDT-R. Neste contexto, a média

do sinal envolve a aquisição sucessiva de dados até que os requisitos pré-estabelecidos sejam atendidos. No entanto, essa abordagem pode resultar em um tempo de medição consideravelmente prolongado, o que pode tornar inviável a utilização do sistema em diversas aplicações.

Portanto, ao projetar o sensor, é necessário considerar cuidadosamente o balanço entre vários aspectos cruciais, como a resolução espacial, a resolução de temperatura, o alcance e o tempo de medição. Esses elementos desempenham um papel fundamental na otimização do sistema de detecção.

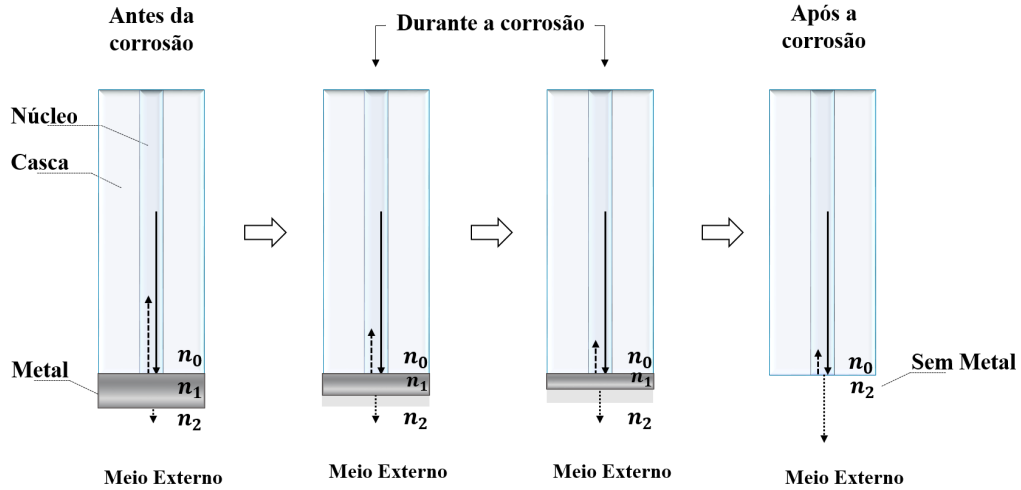
2.4 MONITORAMENTO DE CORROSÃO UTILIZANDO FIBRA ÓPTICA DE FACE METALIZADAS

A corrosão é um processo espontâneo que gradualmente transforma os materiais metálicos, comprometendo sua durabilidade e finalidade original. Portanto, é crucial priorizar a preocupação com o problema da corrosão desde as etapas iniciais do projeto de estruturas metálicas ou com metal em sua composição (FEIJÃO, 2010). Essa abordagem proativa permite que sejam adotadas medidas adequadas para mitigar os efeitos corrosivos, garantindo a longevidade e o desempenho dos materiais utilizados. Assim, ao considerar a corrosão como um aspecto crítico, é possível evitar perdas significativas em termos de recursos, tanto financeiros quanto humanos. Uma alternativa interessante e eficiente para o monitoramento da corrosão em estruturas são os sensores de corrosão de fibra óptica baseado em filme fino (BAO; CHEN, 2012). Esses sensores são capazes detectar rapidamente a localização da corrosão e fornecer algumas informações úteis, como profundidade, velocidade, etc (QIAO; ZHOU; OU, 2006).

O sensor de corrosão de fibra óptica baseado em filme fino é composto por um prolongamento de fibra óptica com a face clivada, revestida por uma camada de filme fino metálico. A Figura 6 ilustra a região de detecção do sensor de fibra óptica com uma camada metálica localizada na extremidade da fibra, análogo ao elemento sensor de corrosão utilizado neste trabalho. Nessa metodologia, a fibra óptica é responsável por transmitir o sinal de uma fonte de luz até a região de detecção, onde um filme fino metálico, similar ao material alvo, é utilizado para monitorar a corrosão através das mudanças em sua espessura. A diferença entre a luz incidente e a luz refletida serve como um indicador das alterações que ocorrem na superfície do filme (QIAO; ZHOU; OU, 2006). Essas mudanças podem ser resultado da corrosão do filme quando exposto a agentes corrosivos específicos, os quais podem causar variações na sua espessura (QIAO; ZHOU; OU, 2006). Essas variações afetam a intensidade do sinal óptico refletido, e é possível obter essa modulação através das Equações de Fresnel, que descrevem a interação da luz com a superfície do filme (FONTANA; PANTELL, 1988). A Figura 6 mostra ainda a alteração da espessura do filme ao longo do processo corrosivo. A Figura 6 ilustra os diferentes estágios do processo de corrosão, mostrando as mudanças nos efeitos ópticos, como reflexão, transmissão e absorção de luz, à medida que o filme fino metálico é corroído. A Figura

6 também destaca as características do elemento sensor de monocamada de metal utilizado no estudo.

Figura 6 – Elemento sensor de corrosão e sequência de etapas durante o processo de corrosão em um filme fino metálico até a remoção completa do metal.



Para um filme transparente de camada única e considerando a propagação normal da luz em relação às interfaces, os coeficientes de Fresnel para a interface entre a fibra e o filme (r_1) e a interface entre o filme e o meio externo (r_2) podem ser expressos, respectivamente (QIAO; ZHOU; OU, 2006):

$$r_1 = \frac{n_0 - n_1}{n_0 + n_1}, \quad (15)$$

$$r_2 = \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2}, \quad (16)$$

em que n_0 , n_1 e n_2 são os índices de refração da fibra, do filme e do meio externos, respectivamente. No caso de meios absorvedores, como um filme metálico, o índice de refração do meio é descrito como a soma de uma componente real (n') e uma componente complexa (κ). Essa representação complexa leva em consideração os efeitos de absorção da luz pelo material metálico. O índice de refração complexo é geralmente expresso na forma:

$$n = n' - j\kappa. \quad (17)$$

Assim, os coeficientes de reflexão nas interfaces são:

$$r_1 = \frac{n_0 - n_1 + j\kappa_1}{n_0 + n_1 - j\kappa_1}, \quad (18)$$

$$r_2 = \frac{n_1 - j\kappa_1 - n_2}{n_1 - j\kappa_1 + n_2}, \quad (19)$$

No entanto, em meios absorventes, a atenuação da onda refletida depende da distância percorrida dentro do meio, levando em conta a absorção da energia da onda (QIAO; ZHOU; OU,

2006). Portanto, é necessário considerar a atenuação ao longo do caminho percorrido dentro do meio absorvente para determinar corretamente a amplitude da onda refletida. Assim, o coeficiente geral de reflexão de Fresnel da luz incidente em duas faces paralelas, que leva em conta tanto a reflexão interna quanto a transmissão da onda, é:

$$r = \frac{r_1 + r_2 e^{-j\phi_1}}{1 + r_1 r_2 e^{-j\phi_1}}, \quad (20)$$

em que ϕ_1 é a mudança de fase da luz incidente devido a passagem no filme fino metálico, para a i -ésima camada metálica, é dada por:

$$\phi_i = \frac{4\pi n_i d_i}{\lambda}, \quad (21)$$

em que termo " i " indica o número de filmes metálicos presentes na superfície da fibra, onde n_i e d_i representam o índice de refração e a espessura do i -ésimo filme, respectivamente, enquanto λ é o comprimento de onda da luz incidente no vácuo. Neste trabalho, o elemento sensor, para corrosão, tem apenas em uma única camada de filme metálico e, portanto, $n = 1$. Assim, a equação 21 pode ser reescrita considerando um único filme metálico:

$$\phi_1 = \frac{4\pi n d}{\lambda}. \quad (22)$$

A reflectância, definida como o módulo quadrado do coeficiente geral de reflexão de Fresnel, para o caso de camada única é expressa por (QIAO; ZHOU; OU, 2006):

$$R = \left| \frac{r_1 + r_2 e^{-j\phi_1}}{1 + r_1 r_2 e^{-j\phi_1}} \right|^2. \quad (23)$$

O valor de R varia entre 0 e 1, representando a fração da intensidade da onda incidente que é refletida na interface. Quando R é próximo de 0 (zero), indica uma baixa reflectância (pouca energia refletida), enquanto um valor próximo de 1 (um) indica uma alta reflectância (maior parte da energia incidente é refletida).

Através dessas equações, é possível compreender como as variações na espessura do filme fino metálico afetam a quantidade de luz refletida na interface. Ao monitorar as variações na intensidade do sinal óptico refletido na interface entre a fibra e o metal, podemos detectar alterações na reflectância. Durante o processo corrosivo, a taxa de decaimento da amplitude desse sinal tende a aumentar à medida que a corrosão ocorre nos filmes finos metálicos. Ou seja, a reflectância da luz diminui à medida que ocorre a corrosão do filme metálico. Assim, ao observar a diminuição gradual da amplitude do sinal óptico refletido ao longo do tempo, podemos inferir a ocorrência do processo corrosivo nos filmes finos metálicos. Essa monitoração contínua da reflectância oferece uma maneira eficaz de acompanhar e avaliar o progresso da corrosão nesses materiais, permitindo obter informações relevantes, como a taxa de corrosão do filme fino metálico.

2.5 MONITORAMENTO DE ÍNDICE DE REFRAÇÃO BASEADO NA REFLEXÃO DE FRESNEL DA LUZ ANTI-STOKES

O Índice de Refração (IR) é uma propriedade física que descreve como a luz se propaga através de diferentes meios (HECHT, 2002). Esta medida desempenha um papel central na óptica, sendo um dos parâmetros ópticos mais significativos (SINGH, 2002). Contudo, é importante ressaltar que o valor do Índice de Refração (IR) transcende suas aplicações ópticas (WANG et al., 2016). Em setores diversos, como o de petróleo e gás, o monitoramento do IR também desempenha um papel crucial. Ele é utilizado para identificar adulterações em óleos, detectar a presença de contaminantes indesejados e até mesmo para a detecção de vazamentos. Nesse contexto, os sensores de índice de refração baseados em fibras ópticas emergem como uma escolha proeminente, devido às vantagens singulares que essa tecnologia oferece (XI et al., 2007; XU; HUANG; PAN, 2012). Esses sensores, que operam com base em princípios variados, encontram aplicações abrangentes em uma variedade de setores (ZHAO et al., 2010; JORGE et al., 2012; XU et al., 2019; PATIL; PATIL; GHOSH, 2020; XU et al., 2019). Em muitas dessas aplicações, é crucial levar em consideração a influência da temperatura sobre o Índice de Refração (IR) para assegurar soluções precisas e confiáveis.

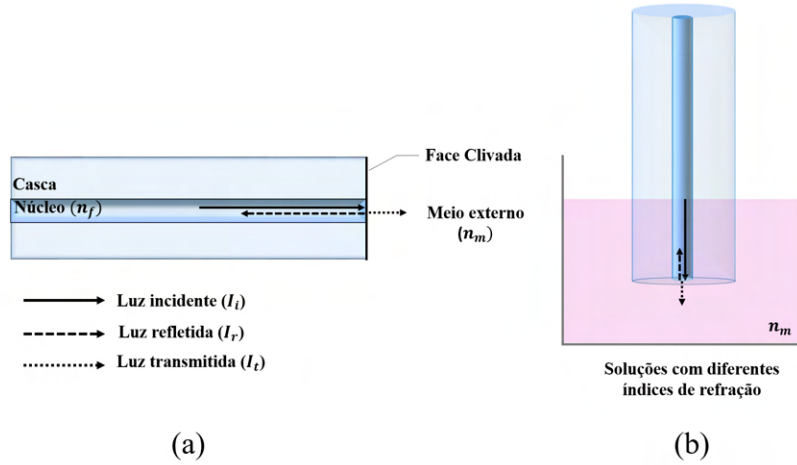
Uma das abordagens para a construção de sensores simultâneos de temperatura e índice de refração é a detecção distribuída baseada em Raman. Nesse método, a temperatura é demodulada com base nas intensidades do Raman anti-Stokes, geradas pelo espalhamento Raman em fibras ópticas, que são altamente sensíveis à temperatura do meio. Ao mesmo tempo, o índice de refração é demodulado com base na reflexão de Fresnel da luz Raman anti-Stokes de Raman na extremidade de uma fibra óptica. Nesse caso, o elemento sensor para o índice de refração é bastante simples: consiste em um prolongamento de fibra óptica com uma face clivada que forma uma superfície lisa e vertical. A ponta da fibra é imersa na solução a ser analisada, permitindo que o índice de refração do meio seja diretamente detectado e medido pela interação da luz com a solução. A medida que o índice de refração do meio sob teste sofre alterações, seja devido à temperatura ou às propriedades do meio, a intensidade do sinal óptico refletido é modulada. Essa modulação pode ser obtida utilizando as equações de Fresnel para a reflexão da luz anti-Stokes. A Figura 7 apresenta o diagrama do elemento sensor de índice de refração, ilustrando a estrutura da fibra óptica com sua face clivada e sua posição em relação à solução analisada.

A Equação de Fresnel relaciona a intensidade da luz refletida na interface entre a fibra e meio com diferentes índices de refração. Considerando uma interface plana, tal como a extremidade da fibra óptica perpendicularmente clivada, a intensidade da luz Raman anti-Stokes refletida na interface pode ser expressa como (WANG et al., 2019):

$$I_r \propto \left(\frac{n_f - n_m}{n_f + n_m} \right)^2, \quad (24)$$

em que n_f e n_m são os índices de refrações efetivos do núcleo da fibra e do meio sob teste. Para

Figura 7 – (a) Esquema do elemento sensor de índice de refração, mostrando a estrutura da fibra óptica com face clivada. (b) Sensor imerso em uma solução sob teste



diferentes meio, a intensidade da reflexão de Fresnel são diferentes e, portanto, pode ser usado como princípio para medir índice de refração. Para calibrar o sistema, a sensor pode-se utilizar um valor de referência (I_0). Essa medida pode ser adotada com o objetivo de reduzir os erros do sistema que podem ser causados pela perda de flexão da fibra, instabilidade da fonte de luz, perda de transmissão da fibra óptica, perda na junção da fibra, perda de acoplamento durante o processo de transmissão óptica e outros (WANG et al., 2018). Isso pode ser feito inserindo a fibra sensora em um meio com índice de refração conhecido (n_0), como água deionizada. De maneira análoga à Equação 24, a intensidade da reflexão de Fresnel da luz anti-Stokes em uma amostra de referência pode ser calculada por meio da seguinte expressão:

$$I_0 \propto \left(\frac{n_f - n_0}{n_f + n_0} \right)^2. \quad (25)$$

Dessa forma, a intensidade relativa R_F pode ser escrita como (WANG et al., 2018; WANG et al., 2019)

$$R_F = \frac{I_r}{I_0} = \left(\frac{n_f - n_m}{n_f + n_m} \cdot \frac{n_f + n_0}{n_f - n_0} \right)^2. \quad (26)$$

Da Equação 26, o índice de refração do meio a ser medido pode ser calculado conforme mostrado abaixo (WANG et al., 2018),

$$n_m = n_f \cdot \left[\left(1 - \frac{(n_f - n_0)\sqrt{R_F}}{(n_f + n_0)} \right) / \left(1 + \frac{(n_f - n_0)\sqrt{R_F}}{(n_f + n_0)} \right) \right]. \quad (27)$$

Assim, o índice de refração do meio n_m pode ser obtido detectando a intensidade do sinal óptico anti-Stokes refletido I_r para a amostra sob teste e uma medida de referência I_0 .

3 SENSORES À FIBRA ÓPTICA: REVISÃO DA LITERATURA

Este capítulo apresenta uma introdução sucinta sobre os sensores a fibra óptica e realiza uma revisão da literatura sobre os sensores de temperatura baseados em Raman, sensores de corrosão e sensores multiparâmetros. A Seção 3.1 é dedicada aos sensores ópticos, onde são apresentadas as características e classificações, com base na natureza, princípio de operação e aplicações desse tipo de sensores para detecção de diversas grandezas. Na Seção 3.2 são apresentados sensores distribuídos para o monitoramento de temperatura, baseados em espalhamento Raman em fibras ópticas. A Seção 3.2 destaca diversos sistemas de monitoramento de temperatura desde os primeiros sensores, propostos há mais de 30 anos, quando a atenuação das fibras óptica era bastante elevada; até os sensores atuais, de alto desempenho, com longo alcance, capazes de operar à temperaturas criogênicas, e propostos para diversas aplicações do mundo moderno. Também serão apresentados o estado atual da pesquisa desses sensores, suas aplicações e os desafios da termometria baseada em Raman. Na Seção 3.3, são apresentados sensores à fibra óptica para monitoramento da corrosão encontrados na literatura, desde os primeiros sensores capazes de detectar apenas a ocorrência da corrosão, propostos há mais de 20 anos, até sensores atuais mais eficientes para o monitoramento em tempo real da corrosão e que fornecem informações importantes, como a taxa de corrosão. Já na Seção 3.4, são apresentados sensores multiparâmetros à fibra óptica, que monitoram simultaneamente duas ou mais grandezas, sendo uma delas obrigatoriamente a temperatura, com ênfase nos sensores de temperatura e índice de refração. São abordados os diferentes princípios de operação e tecnologias utilizadas nesses sensores, discutindo-se também as vantagens e desafios da maioria dos sistemas apresentados. Além disso, a Seção 3.4 evidencia potencial e a tendência de desenvolvimento dos sensores multiparâmetros.

3.1 SENSORES ÓPTICOS

Dois grandes acontecimentos da década de 1960 revolucionaram os sistemas de comunicações: a invenção do *laser* (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*) em 1960; e o desenvolvimento da tecnologia de fibra óptica como meio transmissão de sinal óptico em 1966 (UDD; SPILLMAN-JR, 2011). Mas foi na década de 1970, com a diminuição das perdas da fibra e o desenvolvimento de *lasers* de semicondutores, que os sistemas de transmissão por fibra óptica apresentaram avanços consideráveis e mudaram definitivamente os sistemas de

telecomunicações (UDD; SPILLMAN, 2011). O avanço dessas tecnologias também impulsionou o desenvolvimento de sensores de fibra óptica e tecnologias relacionadas (CULSHAW, 2000). Em 1986 haviam estudos publicados apontando as potencialidades dos sensores à fibra óptica (GIALLORENZI et al., 1982). Portanto, o monitoramento por fibra óptica de grandezas como temperatura, pressão, aceleração, vibração e nível de líquidos já eram discutidos para aplicações potenciais em diversos campos, abrangendo setores desde a construção civil aos ramos da biomedicina nessa época (ROGERS et al., 1998; BOLOGNINI; HARTOG, 2013; CULSHAW, 2000). Além disso, sistemas capazes de realizar medidas distribuídas já haviam sido propostos e demonstrados (HARTOG; PAYNE; CONDUIT, 1980).

O sensores à fibra óptica são pequenos, leves, de alta sensibilidade e de fácil integração ao sistema que se quer monitorar. Devidos às propriedades da sílica, material do qual as fibras ópticas são feitas, esses sensores possuem imunidade à interferência eletromagnética e não conduzem corrente elétrica, tornando-os ideais para diversas aplicações no mundo moderno (HAUS, 2010). Além disso, apresentam diversas outras vantagens em relação aos seus análogos eletrônicos, como a capacidade de realizar medidas a longas distâncias e operar em ambientes severos, como zonas de temperaturas elevadas, alta pressão, e ambientes corrosivos. Por fim, uma das principais características dos sensores de fibra óptica é a capacidade de realizar medidas distribuídas (HAUS, 2010).

Atualmente, existem sensores ópticos bem sucedidos comercialmente, com tecnologias bem estabelecidas e boa performance (BOLOGNINI; HARTOG, 2013; LEE, 2003). Na literatura é possível encontrar uma vasta quantidade de sensores à fibra óptica propondo aplicações tradicionais e inovadoras, com a utilização de protocolos e técnicas de medição cada vez mais aprimoradas (UDD; SPILLMAN, 2011; HAUS, 2010). Na construção, também são utilizados nos projetos desses sensores diversos tipos de fibra, como fibras monomodo, multimodo, metalizadas, fibra em perfil D, fibra de grade de Bragg, e outros (LUO et al., 2019). Apesar disso, todos os sensores ópticos têm uma estrutura fundamental comum: fonte de luz, componentes ópticos para guiar a luz e detector (UDD; SPILLMAN, 2011).

O sinal transmitido por fibra óptica pode ser modulado em decorrência de fatores externos, sejam eles de natureza física, química ou biológica (UDD; SPILLMAN, 2011). As mudanças no sinal óptico, decorrentes desses fatores, podem ser apropriadamente traduzidas e relacionadas as grandezas que se quer medir.

Baseado no modo de detecção do parâmetro que se deseja medir, no princípio subjacente e na região de operação os sensores ópticos podem ser classificados de diversas formas (UDD; SPILLMAN, 2011). No que se refere ao modo de detecção, os sensores a fibra óptica podem ser classificados em extrínseco, quando a detecção ocorre numa região externa à fibra; e intrínseco, quando a detecção ocorre dentro da fibra. É importante destacar que, embora os sensores de fibra óptica sejam comumente divididos em dois grupos principais: intrínsecos e extrínsecos, é possível utilizar técnicas de engenharia para combinar as características de ambos para obter

melhores resultados em termos de precisão, sensibilidade e faixa de medição. Existem algumas abordagens para combinar essas duas classes de sensores, como por exemplo, utilizar uma fibra intrínseca para medir uma grandeza física e uma fibra extrínseca para monitorar as condições ambientais que podem afetar a precisão da medição. Outra possibilidade é usar uma fibra intrínseca para medir uma grandeza física em um ambiente controlado e uma fibra extrínseca para medir a mesma grandeza em condições adversas. Além disso, as combinações de sensores intrínsecos e extrínsecos também podem ser utilizadas para medir grandezas físicas que não podem ser medidas apenas com um tipo de sensor. Por exemplo, utilizando uma combinação de sensores intrínsecos e extrínsecos, é possível medir a temperatura e o índice de refração. Em resumo, combinar os sensores intrínsecos e extrínsecos de fibra óptica pode oferecer uma melhor performance e possibilidade de medir grandezas físicas que não poderiam ser medidas apenas com um tipo de sensor. Quanto a região de operação, os sensores de fibras ópticas podem ser classificados como sensores de ponto, quase distribuídos (ou multiponto) e distribuídos (LI et al., 2012). Os sensores de ponto só detectam a grandeza física em um único ponto, enquanto os sensores quase distribuídos detectam em vários pontos ao longo da fibra, mas não ao longo de toda a extensão da fibra. Os sensores distribuídos, por outro lado, utilizam toda a extensão da fibra como a região de detecção. O princípio de operação desses sensores baseia-se nas propriedades do sinal óptico, que é modificado por fenômenos externos, como alterações físicas, químicas ou biológicas. Essas modificações são detectadas e analisadas para medir a grandeza física desejada. A natureza desses fenômenos comumente designa as aplicações desses sensores (LI et al., 2012). Os sensores de fibra óptica distribuídos e quase distribuídos são os principais destaques deste trabalho.

3.1.1 Sensores distribuídos

As fibras ópticas possuem várias características exclusivas que tornam os sensores ópticos uma tecnologia inovadora e altamente confiável para aplicações industriais (SILVA; SEGATTO; CASTELLANI, 2022). Uma das principais características é a capacidade de realizar medidas distribuídas, o que significa que é possível medir parâmetros em vários pontos ao longo de uma fibra óptica sem a necessidade de instalar sensores adicionais (YIN; RUFFIN, 2002). Isso permite uma monitoração contínua e precisa de parâmetros como temperatura, pressão, vibração e deformação, com uma resolução muito alta e sem interrupções. Com a capacidade de realizar medidas distribuídas combinada com a robustez e a segurança das fibras ópticas, os sensores ópticos são capazes de revolucionar a forma como os processos industriais são monitorados e controlados (BAO; CHEN, 2012).

Os sensores distribuídos fazem parte da classe dos sensores intrínsecos, que incluem sensores ópticos baseados no espalhamento de Rayleigh, Brillouin e Raman (UDD; SPILLMAN, 2011). Cada tipo de sensor óptico tem suas próprias características e aplicações específicas. Quando uma onda eletromagnética é transmitida através de uma fibra óptica, a luz é redistribuída

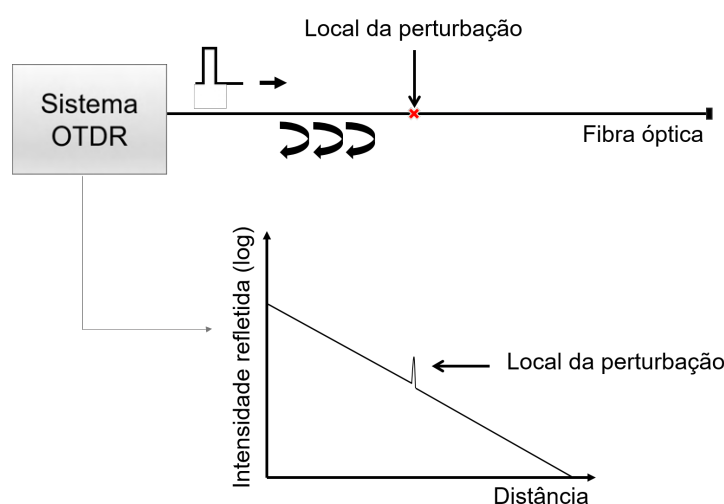
por vários mecanismos, como o espalhamento Rayleigh, Brillouin e Raman (BAO; CHEN, 2012). Assim, as alterações locais de temperatura, tensão e vibração, por exemplo, são retransmitidas de volta para as fibras ópticas, e o sinal espalhado na fibra é modulado por esses parâmetros físicos (BAO; CHEN, 2012). A medição das alterações no sinal modulado permite a construção de sensores à fibra óptica distribuídos. Contudo, para determinar a distribuição espacial de uma grandeza, é preciso usar técnicas e protocolos de detecção apropriados (BOLOGNINI; HARTOG, 2013).

Muitos sensores distribuídos operam através de técnicas de reflectometria óptica, como a reflectometria óptica no domínio do tempo (OTDR - Optical Time-Domain Reflectometry). 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 e a natureza desses eventos (GRATTAN; SUN, 2000). Esses efeitos são decorrentes de perturbações na fibra (internas e externas), e podem ter origens diversas (KERSEY; DANDRIDGE, 1988). A resolução da localização desses eventos é chamada resolução espacial:

$$\Delta z = \frac{\tau c}{2n_e}, \quad (1)$$

em que τ é a largura temporal do pulso de luz emitido, c é a velocidade da luz e n_e corresponde ao índice de refração efetivo do núcleo da fibra (BAO; CHEN, 2012). A Figura 8 mostra o princípio de operação de um sensor distribuído usando OTDR. Na detecção distribuída, a técnica OTDR foi primeiramente empregada por A. J. Rogers, em 1980 (ROGERS, 1980).

Figura 8 – Sensor distribuído usando OTDR.



Fonte: criada pelo autor .

Além do domínio temporal, os sensores distribuídos também podem ser implementados no domínio da frequência por meio da técnica de reflectometria óptica no domínio da frequência (OFDR - Optical Frequency Domain Reflectometry). A OFDR 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 (SHADARAM, 1984). Essa frequência resultante é proporcional à distância ao longo da fibra (MACDONALD, 1981). O sensoriamento distribuído de frequência é especialmente útil em aplicações em que é necessário detectar sinais fracos ou em meio a ruído elevado com o objetivo de obter melhor resolução espectral e precisão (DING et al., 2018). No entanto, esses sistemas comumente apresentam uma limitação em termos de comprimento da fibra que pode ser medido.

Os sensores distribuídos para o monitoramento de temperatura baseados em efeitos ópticos não lineares, como espalhamento Raman e Brillouin, têm se tornado cada vez mais populares devido às suas vantagens únicas. Esses efeitos, quando aplicados em fibras ópticas, permitem uma diversidade de respostas a estímulos externos, tornando-se assim atraentes para o desenvolvimento de novos sensores com várias aplicações. Um método amplamente utilizado é o retroespalhamento de luz com técnica OTDR, onde a informação desejada é obtida a partir dos campos retroespalhados. Esse método apresenta vantagens significativas, como a alta sensibilidade e a capacidade de operação a partir de apenas uma extremidade da fibra óptica, e o comprimento de detecção pode variar de metros a dezenas de quilômetros. As características intrínsecas a diferentes tipos de sistemas de detecção distribuída direcionam sua implementação para certas tarefas ou indústrias onde essas características são mais úteis ou necessárias. Nesse sentido, ao longo dos últimos 30 anos, um grande número de sensores distribuídos é de amplo espectro de aplicações. Algumas aplicações incluem: monitoramento da saúde de grandes infraestruturas (RUI et al., 2017; CARPENTER, 2016), detecção de incêndios e monitoramento de temperatura (LU et al., 2019b; LIU et al., 2016), detecção de gases e pH (potencial hidrogeniônico) de soluções (WARREN-SMITH et al., 2010; LU et al., 2019a), monitoramento de vibração e detecção de ondas acústicas em ductos e linhas de transmissão (DOU et al., 2017; MUNN et al., 2017), detecção de campo elétrico e de campo magnético (PALMIERI; SARCHI; GALTAROSSA, 2015; DING et al., 2015).

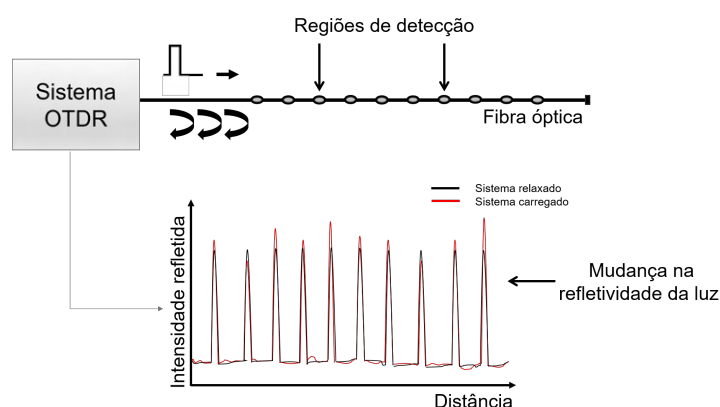
3.1.2 Sensores quase-distribuídos

A diferença entre os sistemas distribuídos e quase-distribuídos está associada ao processo de medição e ao nível de distribuição dos sensores. Enquanto os sistemas distribuídos são caracterizados por sensores que medem ao longo da extensão inteira de uma fibra, os sistemas quase-distribuídos possuem sensores que medem em pontos discretos e bem definidos, ao longo de uma fibra ou em uma estrutura. Isso permite que os sensores quase-distribuídos sejam usados para medir parâmetros em diferentes pontos de uma estrutura ou fibra, como no caso de sensores para monitoramento de estruturas de construção, enquanto os sensores distribuídos são usados

para medir parâmetros ao longo de uma extensão inteira.

No sistema sensor quase-distribuído, comumente são utilizadas técnicas de reflectometria óptica, como OTDR, OFDR e OTDR modificado, para determinar possíveis efeitos ópticos associados à atenuação na fibra, reflexão de Fresnel e fluorescência (KERSEY; DANDRIDGE, 1988; WANG et al., 2017). A Figura 9 mostra um esquema simplificado de um sensor quase-distribuído utilizando a técnica OTDR proposto por Cibula e Donlagic, em 2007 (CIBULA; DONLAGIC, 2007). Nesse sistema é possível medir variações de tensão através de mudanças na refletividade da luz em pontos isolados na fibra óptica (CIBULA; DONLAGIC, 2007). Isso é possível porque as propriedades ópticas do sinal transmitido são alteradas em pontos específicos devido a variações ambientais, como a pressão. Os sensores quase-distribuídos podem

Figura 9 – Esquema simplificado de um sensor quase-distribuído usando OTDR (CIBULA; DONLAGIC, 2007).



Fonte: adaptado de Cibula, Donlagic (2007)

ser combinados para formar uma rede de sensores multiplexadas (KERSEY; DANDRIDGE, 1988). Sensores discretos, que são projetados para operar como sensores individuais, podem ser organizados em uma configuração de rede ou matriz, onde cada elemento sensor atua em um conjunto para coletar e transmitir dados (KERSEY, 1993; UDD; SPILLMAN-JR, 2011; MOREY; DUNPHY; MELTZ, 1991). Para transmitir dados via fibra, esses sensores podem ser integrados ao um sistema de interrogação usando técnicas como divisão de frequência multiplexação (FDM), multiplexação por divisão de tempo (TDM) e multiplexação por divisão de comprimento de onda (WDM), que pode ser utilizada para sistemas de comunicações ópticas multiplexadas (LEAL-JUNIOR et al., 2019; UDD; SPILLMAN-JR, 2011). Essas redes de sensores são úteis para monitorar grandes áreas ou sistemas complexos, como estruturas de construção, edifícios inteligentes, sistemas de transporte e infraestrutura crítica. Além disso, elas podem ser utilizadas para monitorar variáveis ambientais, como temperatura, umidade e pressão, e para detectar eventos anômalos ou falhas de sistemas (LEAL-JUNIOR et al., 2019; LI et al., 2019; LI et al., 2021; WANG et al., 2010). Com a capacidade de serem organizadas de variadas maneiras e

utilizando diversas técnicas de comunicação, as redes de sensores multiplexadas se tornam uma ferramenta valiosa para a coleta de dados e monitoramento de diferentes situações.

3.2 SENSORES DE TEMPERATURA BASEADO EM ESPALHAMENTO RAMAN EM FIBRAS ÓPTICAS

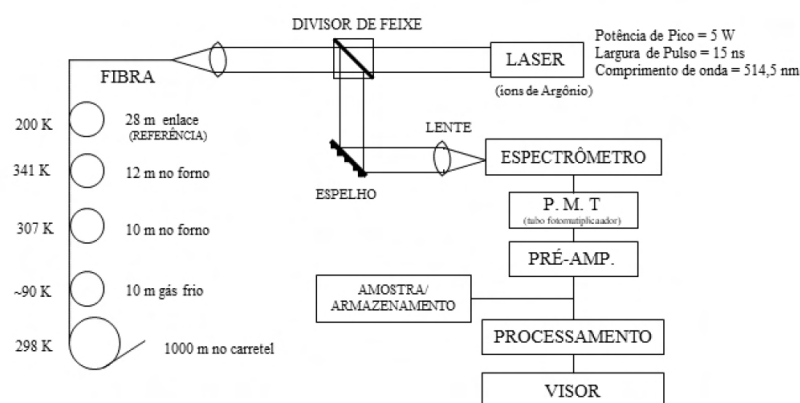
Sensores de temperatura baseados em Raman distribuídos são um tipo comum de sensores de fibra óptica utilizados para monitorar a temperatura em estruturas de grande porte e intensivo em capital financeiro, como aeronaves, pontes, barragens, poços de petróleo e gás, túneis e tubos (SILVA; SEGATTO; CASTELLANI, 2022). Desde a proposta do primeiro sistema SDT-R em 1982, muitas técnicas foram desenvolvidas para superar as barreiras do uso do espalhamento Raman como método de medição de temperatura distribuída. Aqui, alguns dos sistemas SDT-R baseados em reflectometria óptica no domínio do tempo encontrados na literatura serão apresentados. É evidente que muitos esforços de pesquisa foram concentrados em melhorar o alcance, a resolução espacial e de temperatura, sendo estes os aspectos mais estudados.

O desenvolvimento dos sensores distribuídos teve início há mais de 40 anos e, atualmente, o ramo de sensores configura uma das maiores aplicações das fibras óptica. Em particular, a detecção de temperatura distribuída é extremamente útil em muitas aplicações, para as quais os sensores de fibra baseados em espalhamento Raman são uma solução bem conhecida. Por esse motivo, a detecção de temperatura tornou-se uma área crescente de pesquisa e desenvolvimento, competindo com sensores elétricos estabelecidos comercialmente. O primeiro sistema sensor distribuídos para o monitoramento de temperatura foi proposto por Hartog e Payne, em 1982 (HARTOG; PAYNE, 1982). O funcionamento desse sensor é baseado na alteração da potência óptica de sinais Raman retroespalhados em fibras ópticas (HARTOG; PAYNE, 1982). Esse sensor operava com base nas alterações da potência óptica dos sinais Raman retroespalhados em fibras ópticas. Eles utilizaram uma fibra de núcleo líquido de 300 μm de diâmetro, que tinha perdas típicas de 12-13 dB/km, e um laser a gás para transmitir pulsos de 10 ns como fonte de luz. Embora apresentasse algumas limitações, esse sensor foi significativo no desenvolvimento da pesquisa em detecção distribuída de temperatura com base no espalhamento Raman, demonstrando a viabilidade de implementação desses sistemas do ponto de vista comercial.

Em 1985, Dakin e Pratt realizaram os primeiros experimentos bem-sucedidos na detecção distribuída de temperatura utilizando fibras ópticas de sílica multimodo (DAKIN et al., 1985a). Eles empregaram a técnica OTDR para monitorar a temperatura em uma extensão de 1600 metros de fibra, observando as mudanças na intensidade dos sinais retroespalhados Raman anti-Stokes. Para compensar as perdas de potência óptica significativas nas fibras disponíveis na época, utilizaram um laser de gás de alta potência. O experimento envolveu diferentes seções de fibras mantidas em temperaturas controladas, variando de 90 K a 341 K. O esquema experimental

usado para implementar esse sensor é representado na Figura 10. Neste sistema, um laser de íons de Argônio emite pulsos de 15 ns a uma frequência de 514,5 nm, que são injetados na fibra óptica por meio de um divisor de feixes. Os sinais refletidos são separados em um espectrômetro e monitorados no domínio do tempo. A distribuição espacial de temperatura é obtida após amplificação e processamento dos dados (DAKIN et al., 1985a). No mesmo ano (1985), Dakin e colaboradores também apresentaram o funcionamento do sensor de temperatura distribuído empregando a mesma técnicas, mas desta vez usando um laser diodo como fonte de luz e um fotodiodo avalanche como detector. (DAKIN et al., 1985). Isso marcou um avanço significativo, já que a tecnologia de semicondutores permitiu arranjos experimentais mais simples e medições mais precisas nos sistemas SDT-R (UDD; SPILLMAN, 2011).

Figura 10 – Esquema de sensor à fibra óptica para detecção distribuída de temperatura proposto por Dakin e colaboradores (DAKIN et al., 1985a).

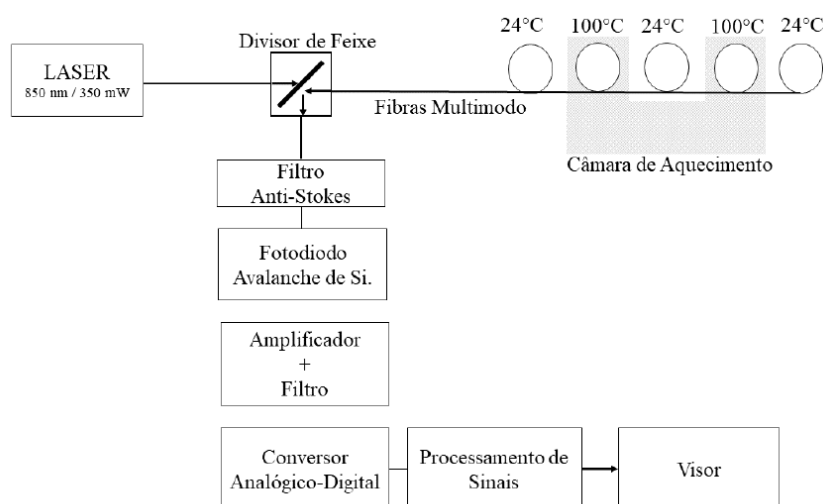


Fonte: adaptado de Dakin et al., (1985).

Em 1985, Hartog, Leach e Gold desenvolveram um inovador sensor distribuído de temperatura usando fibras ópticas de núcleo sólido e a técnica de espalhamento Raman (HARTOG; LEACH; GOLD, 1985). Este sistema empregou lasers e detectores de semicondutores, resultando em um dispositivo mais compacto e eficiente em termos de energia (HARTOG; LEACH; GOLD, 1985). Eles monitoraram a temperatura em diferentes pontos de uma única fibra óptica medindo a intensidade dos sinais Raman anti-Stokes por meio de um sistema OTDR-multimodo. A Figura 11 mostra o arranjo experimental do sensor proposto. Nos experimentos, os sinais detectados passavam por etapas de amplificação, conversão analógica - digital e processamento de dados com a fim de se obter o perfil de temperatura ao longo de toda a fibra óptica. A potência óptica máxima do laser usado era cerca de 14 vezes menor que a potência dos demais lasers utilizados nos projetos de SDT-R da época, aumentando, com isso, a eficiência energética desses sistemas (HARTOG; LEACH; GOLD, 1985). Além disso, a utilização de fotodetectores de semicondutores melhorou significativamente a detecção de sinais de baixa intensidade, como os da banda anti-Stokes, o que ampliou o alcance de medição do sensor (HARTOG; LEACH; GOLD, 1985). Com isso, o trabalho de Hartog, Leach e Gold teve

grande relevância 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). A configuração proposta por Hartog e colaboradores, com algumas modificações, constitui estrutura básica dos SDT-R (baseados em OTDR) da atualidade (BOLOGNINI et al., 2007).

Figura 11 – Configuração experimental do sensor distribuído de temperatura baseado em Espalhamento Raman implementado com dispositivos de semicondutores (HARTOG; LEACH; GOLD, 1985).



Fonte: adaptado de Hartog, Leach e Gold (1985).

A partir da década de 1990, os esforços da pesquisa e desenvolvimento dos SDT-R se voltaram para as melhorias da faixa de operação e resolução desses sensores (BOLOGNINI; HARTOG, 2013). Como consequência disso, em 1987, os SDT-R já estavam disponíveis comercialmente. Esses sensores comerciais passaram a operar no comprimento de onda de perda mínima em fibras monomodo de Sílica, em torno de 1550 nm, já que, em sistemas de grandes comprimentos, as perdas de propagação constituem um parcela considerável da intensidade do sinal óptico (HARTOG, 1995). Nesse caso, a utilização de fibras ópticas monomodo também trouxe uma vantagem adicional a esses sistemas, a de que as fibras já instaladas, com cabos de alimentação, por exemplo, para fins de comunicação, podem ser usadas para medições de temperatura (HARTOG, 1995). Simultaneamente, novas fontes de luz foram propostas para detecção distribuída de temperatura a partir de espalhamento Raman anti-Stokes (LEES et al., 1996). Além disso, amplificadores à fibra óptica também passaram a integrar os sistemas SDT-R (WAKAMI; TANAKA, 1994; GRATTAN; SUN, 2000).

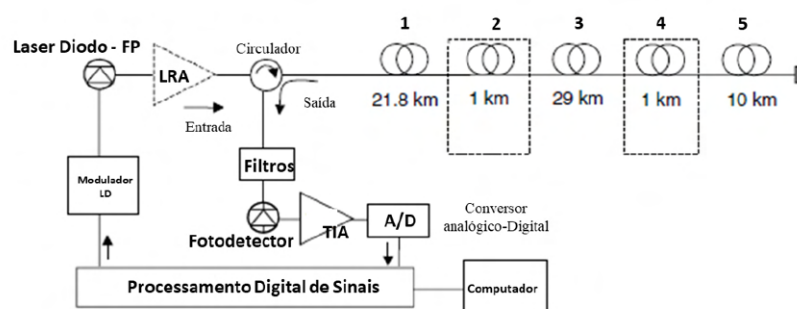
Em 1994, Toshinori Wakami e Shigeru Tanaka apresentaram e demonstram pela primeira vez um sensor de temperatura baseado em espalhamento Raman de longo alcance operando em 1550 nm, e utilizando um amplificador de fibra dopada com Érbio (EDFA) (WAKAMI; TANAKA, 1994). A introdução de um módulo de amplificação ao sistema sensor possibilitou

o aumento de mais de 20 km o alcance dos SDT-R, e boa precisão na medição (WAKAMI; TANAKA, 1994).

Desde os trabalhos pioneiros de Hartog, Dakim, Wakami, diversos esquemas SDT-R têm sido propostos, utilizando técnicas e protocolos de medições diferentes, com o objetivo de aperfeiçoar esses sistemas, melhorando parâmetros como alcance, resolução espacial de temperatura, sensibilidade, faixa de operação, custos e outros (GRATTAN; SUN, 2000; HÖBEL et al., 1995; BOLOGNINI et al., 2006; SOTO et al., 2007; BARONTI et al., 2010; TANNER et al., 2011). Nesse sentido, sensores de alta performance viáveis e econômicos, capazes de operar em longas distância (40 km) com alta resolução já foram propostos e demonstrados (SILVA; SEGATTO; CASTELLANI, 2022; BOLOGNINI et al., 2007; ZHANG et al., 2020; DATTA; SANKAR; SRINIVASAN, 2022). Esses sensores podem ser alcançados usando codificação de sinais, detecção direta, módulo adicional de amplificação e protocolos de processamento de dados aprimorados.

Um exemplo de sensor de alta performance é sistema proposto por Bolognini e colaboradores em 2007 (BOLOGNINI et al., 2007). Os autores demonstraram experimentalmente o funcionamento de um sistema SDT-R usando o laser diodo de baixa potência, o OTDR codificado (255 bits), e a amplificação Raman discreta, conforme mostra o esquema da Figura 12. Nesse sistema, o laser é modulado em amplitude para gerar pulsos codificados no padrão *Simplex*. Os pulsos gerados são amplificados por um amplificador Raman discreto (LRA - lumped Raman amplification), e enviados para uma fibra de teste, por meio de um circulador óptico. Um filtro passa banda de banda larga com duas portas também é usado para selecionar os sinais de interesse: a luz retroespalhada Raman anti-Stokes e Rayleigh. O sinal é finalmente enviado ao receptor, e os dados são processados. A partir dos resultados experimentais obtidos, os autores mostraram 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 o OTDR-Codificado.

Figura 12 – Arranjo experimental 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).

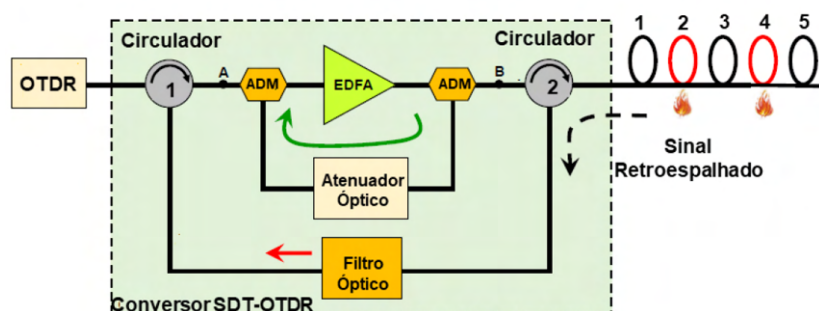
Também são relatados, na literatura, trabalhos que evidenciam o uso de OTDR codificado e OTDR comercial combinados à amplificadores do tipo EDFA, em esquemas SDT-R econômicos, compactos e eficientes, capazes de operar em distâncias de até 30 km ; SOTO et al., 2011a (SOTO et al., 2011; PARK et al., 2006; BASSAN et al., 2015; BASSAN et al., 2016). Em 2015, Bassam e colaboradores asistema de Sensor Distribuído de Temperatura por Fibra Óptica (SDT-R) usando a técnica OTDR codificada e um amplificador EDFA (Amplificador de Fibra Dopada com Érbio) com controle de ganho totalmente óptico(BASSAN et al., 2015). Eles demonstraram experimentalmente que essa abordagem melhorou significativamente o desempenho do sensor em comparação com o sistema que usava apenas OTDR codificado. Além disso, o esquema de controle de ganho implementado possibilitou minimizar as distorções na forma de onda causadas por efeitos transientes típicos do sinal de propagação, como os sinais OTDR codificados; e melhorar a relação sinal ruído do sinal retroespalhado anti-Stokes (BASSAN et al., 2015).

Em 2016, Bassam e colaboradores, apresentaram, pela primeira vez, um sensor de temperatura baseado em espalhamento Raman usando um OTDR comercial codificado, e um EDFA padrão (BASSAN et al., 2016). No esquema proposto, o EDFA de ganho controlado amplifica os pulsos emitidos pelo OTDR para gerar sinal retroespalhado Raman anti-Stokes. O controle de ganho foi implementado conforme apresentado em (Bassan *et.al.*, 2015). A configuração experimental implementada está esquematizada na Figura 13. Nesse esquema, o OTDR, operando a 1536 nm, foi usado para emitir pulsos de 100 ns. O sinal de retorno foi 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. O desempenho do sensor foi avaliado para temperaturas entre 21 e 80°C, usando 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 (BASSAN et al., 2016). Isso pode ser visto a partir do pico da intensidade anti-Stokes em regiões de aquecimento, exibidos na 14. O melhor resultado foi obtido usando o OTDR com maior faixa dinâmica de operação. Com essa técnica, foram alcançados 10 m de resolução espacial, e 16,5 dB de faixa dinâmica (BASSAN et al., 2016).

Os trabalhos de Bassam e colaboras mostram a factibilidade de implementação de sistemas de detecção distribuída de temperatura usando equipamentos OTDRs comercialmente disponíveis, e o seu potencial para medições. Além disso, mostram o aprimoramento da faixa de detecção, quando módulos de amplificação EDFA são introduzidos aos esquemas de detecção distribuída de temperatura baseado em espalhamento Raman em fibras ópticas convencionais, usando a técnica OTDR.

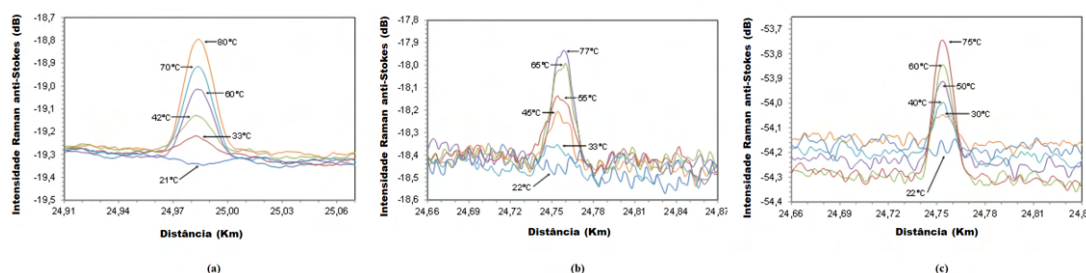
Apesar dos sistemas Raman OTDR serem uma tecnologia consolidada, o objetivo atual da pesquisa em SDT-R é melhorar esses sistemas para atender às novas demandas específicas

Figura 13 – Esquematização do arranjo experimental 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).

Figura 14 – Curvas OTDR para o primeiro ponto de aquecimento (carretel 2): (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; citebassan2016distributed.



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

que surgiram com aplicações mais rigorosas e recentes (DATTA; SANKAR; SRINIVASAN, 2022). Estes desafios incluem melhorias na faixa de detecção, precisão de temperatura, resolução espacial, como tem sido evidenciado até aqui.

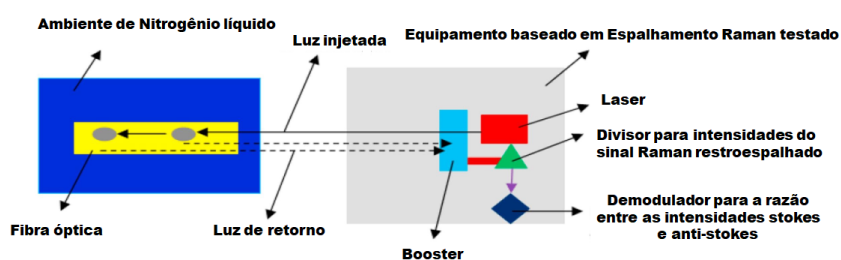
Em 2019, Canjie Xin e Mingzhi Guan implementaram e caracterizaram um novo sensor distribuído de temperatura baseado em Espalhamento Raman, operando sob carga mecânica, campo magnético variável e resfriamento criogênico usando Nitrogênio líquido. O sensor foi proposto para monitoramento de temperatura em têmperas de ímã supercondutores (XIN; GUAN, 2019). O diagrama de blocos do esquema experimental utilizado é apresentado na Figura 15. O sistema experimental incluiu um criostato com célula de carga mecânica e um ímã, e a técnica OTDR foi usada para monitorar a taxa de variação das intensidades retroespalhadas anti-Stokes e Stokes. Isso permitiu obter perfis de temperatura sob carga termomecânica e termomagnética. Para melhorar o desempenho do sensor em ambientes criogênicos, foi realizada uma codificação

de sinais no padrão CC-Golay , baseado em correlação, para obter alta resolução espacial e melhorar a relação sinal-ruído.

O sensor incluiu 10 km de fibra óptica no link sensor, com uma seção de 660 m revestida com material polimérico macio mantido em temperatura criogênica ($-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ até $-106\text{ }^{\circ}\text{C}$). O revestimento polimérico serviu para proteger a fibra contra diferentes forças de tração. Além disso, o sensor passou por avaliações para verificar sua sensibilidade a efeitos magnéticos e mecânicos sob carga. Também foram conduzidos testes adicionais usando fibra óptica revestida com material ferroelétrico para proteção contra campos magnéticos na medição de temperatura. Os resultados experimentais mostraram que o sistema SDT-R distribuído tem alta precisão e repetibilidade durante o resfriamento. Sob temperatura criogênica, o sistema sensor não mostrou-se sensível aos efeitos magnéticos e mecânicos (XIN; GUAN, 2019). De modo que, o sensor, baseado em Raman, pode detectar a temperatura criogênica distribuída de forma sensível, sem métodos de compensação para neutralizar o efeito magneto-térmico ou termomecânico (XIN; GUAN, 2019).

O trabalho de Canjie Xin e Mingzhi Guan têm grande relevância para a literatura de SDT-R, pois evidencia a capacidade desses sistemas de fazer medições adequadas de temperatura tão baixas quanto temperaturas criogênicas, em ambientes com estresse mecânico, e presença de campo magnético. Além disso, mostra a atualidade das pesquisas direcionadas aos SDT-R, com aplicações modernas, como monitoramento de temperaturas em cabos excitados por supercondutores, e aplicações potenciais futuras.

Figura 15 – O diagrama de blocos da medição de temperatura do SDT-R Raman em ambiente de Nitrogênio líquido (XIN; GUAN, 2019).



Fonte: adaptado de Xin e Guan (2019).

No âmbito de pesquisas visando aperfeiçoar os sistemas SDT-R, especificamente no que diz respeito à faixa de temperatura de funcionamento, um estudo relevante foi realizado por Laarossi, Quintela-Incera e Lopez-Higuera em 2021 (LAAROSSSI; QUINTELA-INCERA; LÓPEZ-HIGUERA, 2021). Diferentes fibras ópticas com revestimentos distintos foram testadas para determinar qual delas funcionava com maior precisão e confiabilidade em ambientes hostis ao longo de períodos prolongados. As medições foram realizadas em ciclos de temperatura ao longo de 7 dias, simulando condições semelhantes às encontradas em ambientes industriais. (LAAROSSSI; QUINTELA-INCERA; LÓPEZ-HIGUERA, 2021). Com base nos resultados

obtidos, o estudo permitiu avaliar como cada tipo de fibra reagiu ao aumento da temperatura, o que ajudou a calcular seu impacto na precisão das medições em um sistema SDT-R em altas temperaturas. Durante os testes experimentais, as fibras ópticas foram submetidas a ciclos térmicos programados entre a temperatura ambiente e 360°C. Os resultados indicaram um aumento significativo no erro das medições de temperatura ($> 40^{\circ}\text{C}$) ao usar fibras revestidas com alumínio e ouro. Por outro lado, as fibras revestidas com poliamida se destacaram como a escolha preferencial para aplicações industriais, apesar de apresentarem uma limitação na faixa de temperatura de operação em comparação com as outras fibras (LAAROSI; QUINTELA-INCERA; LÓPEZ-HIGUERA, 2021).

Os sistemas de detecção distribuída de temperatura baseados em Raman enfrentam um desafio significativo em equilibrar a precisão da temperatura com a resolução espacial. Isso ocorre porque a obtenção de uma boa resolução espacial exige o uso de pulsos de curta duração, o que pode resultar em uma baixa relação sinal-ruído e comprometer a precisão da medição de temperatura, especialmente em sistemas de longo alcance. Nesse sentido, muitos estudos estão sendo realizados com o objetivo de encontrar um equilíbrio que preserve tanto a precisão das medições quanto uma resolução espacial adequada (DATTA; SANKAR; SRINIVASAN, 2022). Dentre as estratégias utilizadas, muitos trabalhos apontam várias técnicas de pós-processamento de dados como propostas para alcançar uma melhor precisão de temperatura, mantendo a resolução espacial (ZHANG et al., 2009; ZHANG et al., 2020; SAXENA et al., 2015; LI et al., 2018; PAN et al., 2016; SOTO; RAMIREZ; THÉVENAZ, 2016; DATTA et al., 2021).

Wang e colaboradores propuseram abordagem inovadora para melhorar a relação sinal-ruído em sistemas de detecção distribuída de temperatura por Raman. (WANG et al., 2017; WANG; LIU; WANG, 2019; WANG et al., 2021). Os sistemas propostos utilizam a filtragem mediana, um método não linear comumente usado na redução de ruído de imagens, para processar os sinais Raman anti-Stokes e Stokes retroespalhados. Esse método foi aplicado em um sistema Raman-OTDR convencional com aproximadamente 100 metros de fibras ópticas multimodo no link sensor. Os resultados obtidos mostraram uma redução significativa no desvio máximo médio da temperatura, diminuindo de $4,1^{\circ}\text{C}$ para apenas $1,2^{\circ}\text{C}$ em temperaturas de 40°C , 50°C e 60°C . Essa abordagem demonstrou ser eficaz na melhoria da precisão das medições de temperatura em sistemas de detecção distribuída de temperatura por Raman. (WANG et al., 2021).

Na literatura científica sobre sensores distribuídos de temperatura baseados no efeito Raman, é possível encontrar numerosos estudos teóricos e experimentais com o objetivo de aprimorar a resolução espacial desses sensores. (SILVA; SEGATTO; CASTELLANI, 2022). A resolução espacial desempenha um papel fundamental na qualidade de sistemas SDT-R, pois determina a menor distância que pode ser medida entre dois pontos sob avaliação. Para calcular a resolução espacial, é necessário considerar vários fatores, como a largura do pulso do laser, a resposta do receptor e a resposta da fibra, otimizando cada um deles para obter os melhores resultados possíveis (DATTA; SANKAR; SRINIVASAN, 2022). Diversas abordagens

foram propostas para melhorar a resolução espacial em sistemas de detecção baseados em Raman. Estas incluem a variação das taxas de amostragem dos sinais Stokes e anti-Stokes para eliminar as diferenças na velocidade de propagação dos sinais (WANG et al., 2013), o uso de detectores de fótons de nanofios supercondutores (TANNER et al., 2011; DYER et al., 2012), a criação de redes a partir da malha de uma única fibra (PANDIAN et al., 2010; ZHANG; JIN, 2019), bem como técnicas avançadas de processamento de sinais, como a demodulação de correlação de compressão proposta por Jian Li e colaboradores (2021) (LI et al., 2021). No entanto, essas técnicas podem enfrentar desafios de implementação e altos custos (DATTA; SANKAR; SRINIVASAN, 2022).

Várias técnicas baseadas em aprendizado profundo têm demonstrado sucesso na melhoria da resolução espacial e de temperatura de sensores de temperatura distribuídos (SILVA et al., 2018a; WU et al., 2018; LI et al., 2019; LI et al., 2020; LAAROSSE et al., 2019; ZHANG et al., 2009; DATTA; SANKAR; SRINIVASAN, 2022; SILVA et al., 2021). Um exemplo notável é o estudo realizado por Luís Silva e colaboradores (2018), que introduziram uma abordagem inovadora utilizando uma rede neural autorregressiva não linear com entrada externa para processar a resposta de um sensor de temperatura distribuído. Essa abordagem envolveu a extração de características, regressão e reconstrução do sinal. Os resultados alcançados demonstraram uma significativa melhoria na resolução espacial e de temperatura, com a utilização de redes neurais, possibilitando uma resolução espacial de 5 cm do sensor (SILVA et al., 2018a). Além disso, redes neurais têm sido aplicadas com sucesso para aprimorar a relação sinal-ruído em baixas taxas de amostragem, resultando em uma melhora tanto na precisão das medições quanto na resolução espacial (WU et al., 2018).

Laarossi e colaboradores (2019) introduziram um filtro adaptativo convolucional profundo para aprimorar os SDT-R, melhorando o SNR sem comprometer a precisão ou resolução espacial (LAAROSSE; QUINTELA-INCERA; LÓPEZ-HIGUERA, 2021). Essa abordagem utiliza redes neurais de múltiplas camadas para filtrar os sinais de entrada e capturar informações complexas. O método permite uma resposta mais rápida do sistema e evita a necessidade de muitas médias em uma única medição.

Zhang e colaboradores (2021) introduziram uma técnica de redução de ruído baseada em rede neural convolucional 1-D para melhorar a detecção de temperatura distribuída Raman em fibra óptica monomodo. O método, avaliado em dados reais, reduziu a incerteza da temperatura de 6,4 °C para 0,7 °C com alta fidelidade, sem ajuste manual de parâmetros e independente da taxa de amostragem, tornando-o vantajoso para aplicações práticas. Além disso, pode ser adaptado para outros sistemas de detecção de fibra óptica distribuídos por meio do ajuste fino dos dados (ZHANG et al., 2020).

Li e colaboradores (2020) apresentaram uma abordagem para o reconhecimento de atenuação de diferença dinâmica (DDAR) visando otimizar a SNR em sistemas de detecção distribuída de temperatura Raman em fibra óptica. Os experimentos melhoraram a resolução de

temperatura em uma faixa de 0 a 1000 °C ao longo de 17 km da faixa de detecção para 0,18 °C, mantendo a resolução espacial (LI et al., 2020).

Quando o evento de temperatura é menor do que a resolução espacial do sensor, pode ocorrer uma detecção incorreta desse evento, levando a erros consideráveis na medição de temperatura. Para contornar essas dificuldades dos sistemas SDT-R, Silva e colaboradores (2020) propuseram uma técnica de processamento de imagem para sistemas SDT-R que lida com detecção incorreta de eventos de temperatura devido à resolução espacial. O método corrige erros de temperatura em pontos quentes por meio de uma equação matemática relacionando erro e tamanho espacial, obtendo uma precisão de 98,22% para pontos quentes com tamanhos de 15 m a 3 cm (SILVA et al., 2020).

Nessa mesma linha de pensamento, Gasser e colaboradores (2022) demonstraram um sistema SDT-R baseado em fibra monomodo (SMF) com resolução espacial de 3 centímetros e 1,5°C de resolução de temperatura. Esses resultados foram obtidos em fibras de até 500 metros de comprimento e com alta eficiência dos detectores, simplificando a configuração do sistema e eliminando a necessidade de amplificação EDFA. No entanto, observaram que em fibras ópticas longas, a resolução espacial diminui devido à dispersão cromática, requerendo uma distância mínima de cerca de 4 cm por km de comprimento para detecção de mudanças de temperatura mensuráveis (GASSER et al., 2022).

Zhou e colaboradores (2021) propuseram o uso de um laser caótico como fonte de detecção em sistemas SDT-R para alcançar uma resolução espacial milimétrica. Eles eliminaram o efeito de superposição da resposta Raman, limitando a resolução espacial, e aplicaram técnicas como a reconstrução diferencial no domínio do tempo (TDDR) e a compactação de correlação de domínio de tempo de curta escala (SSTDCC). Isso resultou em uma resolução espacial de 5 mm e sensibilidade à temperatura de 0,1 K, representando um avanço significativo para esses sensores, e ampliam ainda mais as possíveis aplicações dos SDT-R, já que esses sensores podem ser utilizados em zonas quentes com comprimento espacial de nível milimétrico (ZHOU et al., 2021).

Para contornar a baixa intensidade do sinal anti-Stokes em sistemas de detecção distribuída de temperatura baseada em Raman, uma abordagem promissora envolve modificações de hardware, particularmente no receptor do sistema (DATTA; SANKAR; SRINIVASAN, 2022). O desempenho desses sensores está diretamente ligado ao sistema receptor, uma vez que o sinal anti-Stokes, contendo informações cruciais de temperatura, é notoriamente fraco (SILVA et al., 2021). Silva e colaboradores (2021) recentemente conduziram um estudo teórico para caracterizar o receptor de um SDT-R em termos de sensibilidade do sinal anti-Stokes, destacando as relações entre os parâmetros do equipamento receptor e seu impacto no desempenho global. Isso proporcionou uma abordagem mais precisa para melhorar a precisão, alcance e resolução desses sensores (SILVA et al., 2021).

Um alternativa relatada na literatura para aprimorar a SNR dos SDT-R é a produção de

fibras ópticas especiais que permitem aumentar a potência de bombeamento máxima, sem as desvantagens dos efeitos não lineares do espalhamento Raman estimulado. Nessa perspectiva, Degioanni e colaboradores (2015) exploraram dois tipos de substratos de ouro para aprimorar o espalhamento Raman em superfície de gel de sílica amorfa, visando aplicações em sensores distribuídos Raman (DEGIOANNI et al., 2015). Yang et al. (2021) desenvolveram uma fibra monomodo de alto ganho Raman com alta dopagem de flúor e estrutura de índice gradual para medição precisa de temperatura distribuída (YANG et al., 2021). Os resultados mostraram uma melhoria de 6dB na relação sinal-ruído e redução da incerteza de temperatura de 0,9 °C para 0,5 °C em comparação com fibras monomodo convencionais, promovendo sistemas de sensores mais eficientes e precisos.

A extensão máxima de detecção, ou alcance, é um aspecto crítico na pesquisa e desenvolvimento de sistemas SDT-R, e tem sido objeto de interesse desde os primeiros estudos na área (DATTA; SANKAR; SRINIVASAN, 2022). Um dos principais desafios enfrentados em sistemas SDT-R de longo alcance é a baixa intensidade do sinal anti-Stokes. Nesse contexto, as fibras monomodo que operam em comprimentos de onda de baixa atenuação surgiram como a escolha preferida para estender o alcance desses sistemas em longas distâncias.

A Tabela 1 apresenta uma compilação dos principais estudos realizados para medições de longa distância em sistemas de sensoriamento. Os estudos selecionados foram baseados em sua relevância e impacto na área, e muitos deles foram previamente apresentados neste capítulo. Uma observação importante que pode ser feita a partir desses estudos é a tendência das resoluções espaciais (σ_S) e de temperatura (σ_T) se deteriorarem à medida que o alcance do sensor aumenta. Isso ocorre porque a atenuação do sinal ao longo da fibra aumenta com a distância, o que dificulta a detecção precisa de variações sutis de temperatura ou deformação ao longo da fibra.

Embora a resolução seja um parâmetro importante na concepção de sistemas de sensoriamento, a principal preocupação para monitoramento a longas distâncias é o alcance. É preciso encontrar um equilíbrio entre a resolução e o alcance para garantir que o sistema possa detectar as variações de interesse ao longo da fibra, mesmo a grandes distâncias. Por exemplo, em aplicações de monitoramento de estruturas de grandes dimensões, como pontes e túneis, é essencial ter um sistema que possa detectar com precisão as deformações ao longo de centenas de metros ou até quilômetros de fibra óptica. Vale ressaltar que os parâmetros fundamentais, tais como o alcance, resolução espacial e resolução de temperatura de um SDT-R, variam de acordo com as necessidades das aplicações específicas. A escolha desses parâmetros deve ser cuidadosamente avaliada e levada em consideração durante a concepção e implementação do sistema sensor. As exigências de uma aplicação específica podem incluir um alcance maior, uma resolução espacial mais precisa ou uma maior sensibilidade à temperatura, o que pode afetar o projeto do sistema. Dessa forma, é crucial ter um entendimento claro das exigências da aplicação antes de selecionar o sistema de monitoramento adequado.

Portanto, é importante que os sistemas de sensoriamento de longa distância sejam

projetados com a compreensão desses compromissos entre alcance e resolução. A escolha do tipo de fibra óptica, comprimento de onda, potência de bombeamento e outros parâmetros deve ser feita levando em consideração a aplicação específica e os requisitos de desempenho.

Tabela 1 – Estudos de medidas de longa distância em sistemas de sensoriamento

Estudo	Comprimento	Alcance (km)	(σ_S) (m)	(σ_T) (°C)
Bolognini et al. (2007)	40 km	40	17	5
Kuznetsov et al. (2017)	85 km	85	800	8
Lauber et al. (2020)	-	70	4	1
Li et al. (2020)	100 km	80	8	8
Liu et al. (2015)	92 km	42	10	10
Liu et al. (2018)	25 km	25	1,3	1
Malakzadeh et al. (2021)	80 km	70	4	4,5
Nagayama et al. (2011)	30 km	20	1	-
Rosolem et al. (2018)	50 km	50	10	8,4
Silva et al. (2018)	30 km	27	5	5
Soto et al. (2010)	26 km	26	1	3
Yang et al. (2014)	120 km	30	5	5
Yuan et al. (2016)	50 km	20	1	5
Wu et al (2022)	24 km	24	1	1,7
Zhang et al. (2007)	31 km	31	4	0,1

Fonte: o autor, 2023

Em 2017, Kuznetsov e colaboradores demonstraram o sistema SDT-R de longo alcance, no qual medições de temperatura distribuídas foram obtidas em uma fibra monomodo com resolução espacial de 800 m e precisão de 8 °C, alcançando uma distância de até 85 km. Essa foi a maior distância registrada em um sistema desse tipo até o momento (KUZNETSOV et al., 2017). Com o objetivo de superar as limitações do desenvolvimento de SDT-R de longo alcance usando fibras monomodo, os autores apresentaram uma solução que envolve o uso de uma fonte de luz com comprimento de onda superior a 1,6 μm . Essa mudança possibilitou deslocar a faixa de ocorrência do anti-Stokes para cerca de 1,5 μm , onde as perdas são menores do que em 1,4 μm . Além disso, o limite de ocorrência do Espalhamento Raman espontâneo também foi aumentado, permitindo a ampliação da potência da luz incidente e, consequentemente, a intensidade do sinal anti-Stokes Raman.

Para amplificar o sinal da sonda, Kuznetsov et al. usaram amplificadores Raman e amplificadores de fibra óptica dopados com érbio (Er) e itérbio (Yb) em etapas sucessivas. A filtragem do sinal foi otimizada com filtros ópticos passa-banda de dois canais (1,5 e 1,6 μm) e multiplexadores de divisão de comprimento de onda de filme fino (FWM). Eles alcançaram resultados notáveis sem a necessidade de codificação de sinais, o que representa um avanço considerável na melhoria do desempenho e alcance dos SDT-R.

Na literatura, são encontrados relatos de estudos que descrevem SDT-R de longo alcance baseados em Raman, obtidos através da integração de técnicas avançadas (LIU et al., 2018a; LI

et al., 2020; MALAKZADEH; DIDAR; MANSOURSAMAEI, 2021; ROSOLEM et al., 2010; ZHANG et al., 2007; LAUBER; LEES, 2020; ZHANG et al., 2007; KUZNETSOV et al., 2017). Essas técnicas incluem a codificação de sinal, etapas sucessivas ou combinadas de amplificação óptica, o uso de detectores de alta sensibilidade e faixa dinâmica, protocolos sofisticados de processamento de sinais e o uso de filtros ópticos de alta eficiência.

Sensores distribuídos de temperatura baseados em Raman demonstram uma notável capacidade para medir a temperatura com precisão e alta resolução espacial ao longo de extensas fibras ópticas. Isso tem possibilitado aplicações em diversas áreas, como aeroespacial, petróleo e gás, automotiva e médica, onde a monitorização de temperaturas em ambientes remotos e hostis é essencial.

Em muitos estudos, o interesse por operações de longa distância não é uma busca isolada, geralmente acompanhada pela necessidade de sensores que proporcionem alta resolução espacial e/ou de temperatura, além de uma ampla faixa de operação de temperatura. Contudo, a definição desses parâmetros depende dos requisitos específicos de cada aplicação. Em algumas situações, manter um longo alcance é mais importante do que ter alta resolução espacial, enquanto em outras, a prioridade é uma alta resolução espacial para aplicações em curtas distâncias, tudo dependendo da natureza da aplicação em questão (SILVA; SEGATTO; CASTELLANI, 2022; DATTA; SANKAR; SRINIVASAN, 2022).

Por outro lado, avanços recentes na tecnologia óptica têm possibilitado melhorias significativas no desempenho desses sensores. Isso inclui a utilização de detectores mais sensíveis e o desenvolvimento de protocolos avançados de processamento de sinais. Essas melhorias resultaram em maior precisão e sensibilidade na medição da temperatura, além de um aumento no alcance dos sensores.

Em suma, na literatura, encontramos diversos estudos que descrevem técnicas avançadas para a construção de sensores distribuídos de temperatura baseados em Raman de longo alcance. Esses sensores são altamente relevantes em várias áreas de aplicação, e a constante evolução da tecnologia óptica tem possibilitado melhorias significativas em seu desempenho. Apesar dos avanços já realizados na detecção distribuída de temperatura baseada em Raman, ainda há oportunidades emergentes que requerem pesquisas mais aprofundadas e melhorias no projeto desses sensores (DATTA; SANKAR; SRINIVASAN, 2022).

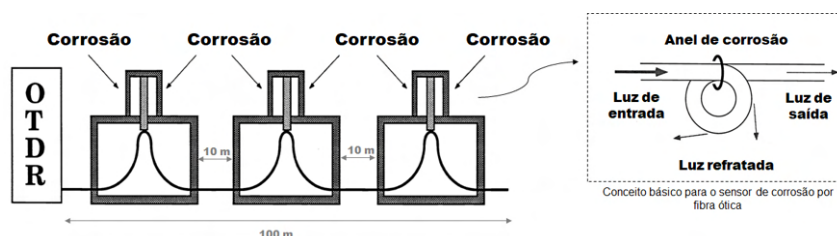
Nesta seção, foram abordados vários estudos científicos que tratam de sensores distribuídos à fibra óptica de temperatura baseados em Espalhamento Raman. Foi apresentado um panorama geral da literatura desses sensores, desde os primeiros sensores propostos na década de 1980, com muitas limitações, até os sensores atuais, com esquemas e técnicas que levaram ao desenvolvimento de sensores de alta performance, além dos desafios, oportunidades e perspectivas atuais na área de detecção distribuída de temperatura baseada em Raman. O estado atual da pesquisa desses sensores também foi destacado, juntamente com alguns dos principais estudos que contribuíram para melhorias na resolução espacial e de temperatura, alcance e faixa

de operação desses sensores, os quais representam a maior parte das pesquisas sobre sensores distribuídos baseados em Raman.

3.3 SENSORES DE CORROSÃO À FIBRA ÓPTICA

Nesta seção, serão apresentados alguns sensores de corrosão propostos ao longo das últimas décadas. Também serão destacadas técnicas de detecção, metodologias empregadas, tipos de fibras utilizadas e suas tecnologias relatadas na literatura de sensores de corrosão à fibra óptica. Kim Bennert e L. McLaughlin desenvolveram, em 1995, um sensor de fibra óptica inovador para monitorar a corrosão em estruturas de aço. O sensor utiliza uma única fibra óptica e se concentra na detecção de corrosão uniforme. Funciona através da modulação da luz que viaja pela fibra óptica multimodo. O sensor emprega anéis metálicos colocados em pontos específicos ao longo da fibra para criar curvaturas milimétricas. Quando esses anéis metálicos corroem, a fibra óptica retorna ao seu estado original, eliminando as perdas devido às curvaturas e resultando em um aumento na luz de saída. As mudanças na intensidade luminosa em cada ponto são monitoradas usando uma técnica chamada OTDR (Reflectometria Óptica no Domínio do Tempo). A Figura 16 ilustra o esquema deste sensor e destaca o seu princípio de funcionamento.

Figura 16 – Esquema de sensor à fibra óptica para monitorar corrosão em múltiplos pontos proposto por Bennet e MacLaughlin. (BENNETT; MCLAUGHLIN, 1995).



Fonte: adaptado de Bennet e MacLaughlin (1995).

O sensor proposto por Bennert e McLaughlin tem limitações, medindo a corrosão em apenas um ponto no tempo, não fornecendo informações sobre o processo de corrosão, como a taxa, e não sendo durável para uso em campo. No entanto, seu projeto econômico demonstrou a viabilidade das fibras ópticas para o monitoramento de corrosão em grandes estruturas metálicas, sendo relevante para o desenvolvimento de sensores ópticos de corrosão.

Em 1996, fibras ópticas metalizadas com revestimento de alumínio foram desenvolvidas para monitorar a corrosão em estruturas aeronáuticas, acompanhando o aumento da luz para detectar o processo corrosivo (RUTHERFORD et al., 1996). No sensor apresentado por Rutherford e colaboradores (RUTHERFORD et al., 1996), ao acompanhar o potência de saída de luz da fibra óptica, o processo de corrosão da estrutura é monitorada pelo aumento da luz (RUTHERFORD et al., 1996). Para mostrar a viabilidade de monitorar a corrosão em estruturas

civis, em 1998, Li e colaboradores apresentaram um sensor de corrosão por fibra óptica fabricado por galvanoplastia de uma liga Fe-C sob o núcleo da fibra para monitorar corrosão em estruturas civis. (LI et al., 1998).

Sihe Abderrahmane e colaboradores (2001) desenvolveram um sensor de corrosão com uma fibra óptica revestida com uma camada de níquel-fósforo. A camada metálica, quando corroída quimicamente, afeta a potência óptica transmitida, detectada por um fotodiodo, permitindo a monitorização da corrosão em um único ponto. O sensor explorou as propriedades de absorção de luz na fibra óptica e ofereceu a vantagem de revestimento homogêneo e medição da cinética de corrosão da liga Ni-P, tornando-o viável para várias estruturas metálicas sem desmontagem significativa (ABDERRAHMANE et al., 2001). Este estudo se destaca ao explorar as propriedades de absorção de luz na fibra óptica e ao utilizar um filme metálico depositado no núcleo da fibra, proporcionando um revestimento uniforme e mensurável. Além disso, permite a análise da cinética de corrosão da liga de Ni-P e demonstra a viabilidade de um sensor de corrosão para aplicação em diversas estruturas metálicas, sem a necessidade de desmontagem significativa (ABDERRAHMANE et al., 2001).

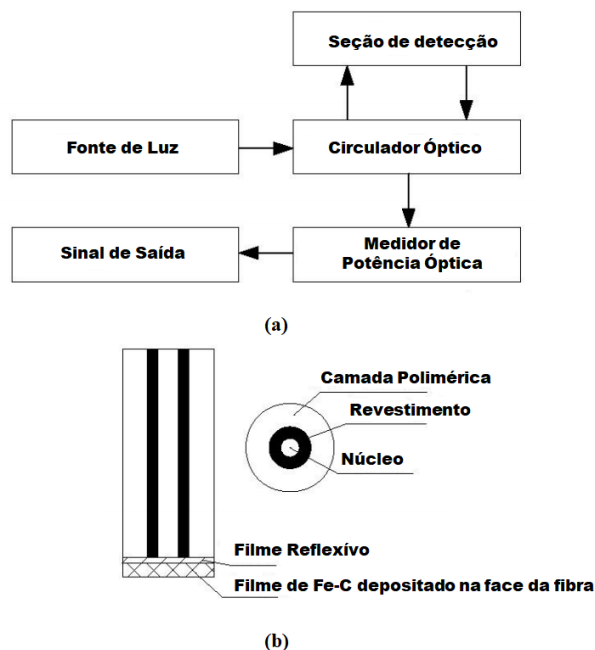
Dong Saying e colaboradores propuseram, em 2006, um sistema sensor para monitorar a corrosão do aço no casco de navios, utilizando fibras ópticas metalizadas por deposição a vácuo e galvanoplastia de um filme Fe-C em uma seção não revestida de 1-2 cm da fibra óptica multimodo. A corrosão do filme de Fe-C é acompanhada pelas mudanças na potência óptica transmitida, detectadas por um medidor de potência no final do enlace óptico, devido às variações na absorção de luz pela liga metálica durante o processo corrosivo. Embora o sensor monitore a corrosão em um único ponto, é capaz de medir a cinética da reação corrosiva da liga metálica. (DONG et al., 2006).

Em 2006, G. Qiao, Z. Zhou e J. Ou desenvolveram um novo sensor de corrosão por fibra óptica baseado em um filme fino de Fe-C. O sistema consiste em uma fibra óptica monomodo com uma ponta revestida com filme fino de Fe-C para detectar variações na espessura desse filme. A Figura 17 (a) mostra o sistema de detecção, e a Figura 17 (b) mostra a seção de detecção de duas camadas. A corrosão é monitorada pela diferença entre a luz incidente e refletida na parte frontal do filme, indicando possíveis alterações na espessura da camada metálica devido à corrosão. Essas mudanças na reflectividade são monitoradas no domínio do tempo e estão relacionadas com a localização e taxa de corrosão do filme sensor (QIAO; ZHOU; OU, 2006).

A seção de detecção está localizada em uma extremidade da fibra com o objetivo de superar o caráter frágil dos sensores do tipo. Embora o design desse sensor permita monitorar a corrosão em um único ponto, o sistema sensor possibilita detectar rapidamente o local da corrosão e fornecer algumas informações úteis, como profundidade, velocidade da corrosão, e outros.

Em 2007, Martins-Filho e colaboradores (MARTINS-FILHO et al., 2007) propuseram pela primeira vez um sistema sensor capaz de monitorar a corrosão em diversos pontos

Figura 17 – (a) Diagrama de blocos do sistema sensor; (b) A ilustração esquemática do sensor de corrosão por fibra óptica com filme fino de Fe-C. (DONG et al., 2006)..

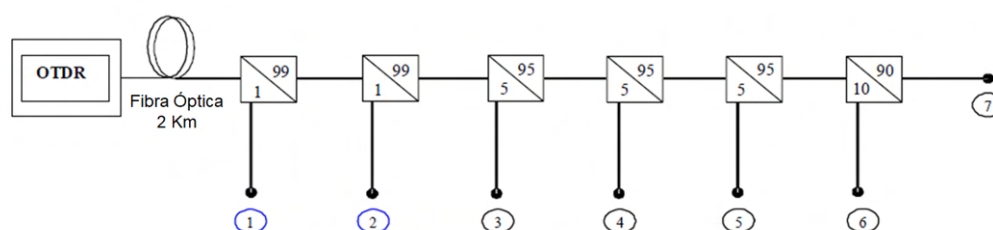


Fonte: adaptado de . Qia o, Z. Zhou e, J. Ou (2006).

discretos. O sensor apresentado consiste em 7 cabeças sensoras, que por meio de uma fibra óptica monomodo, são conectadas a um OTDR comercial. Essas cabeças sensoras atuam como elemento transdutor e consistem em prolongamentos de fibras ópticas com extremidades clivadas, sobre as quais são depositadas filmes finos de alumínio através técnica de evaporação térmica. Acopladores direcionais são usados para dividir o sinal óptico e direcionar um pequena fração desse sinal (1,5% ou 10%) para as cabeças sensoras (MARTINS-FILHO et al., 2007). A Figura 18 mostra a configuração do sensor de corrosão proposto por Martins-Filho e colaboradores (2007). O processo corrosivo é acompanhado por meio do equipamento OTDR que detecta as alterações de intensidade da luz refletida por cada cabeça sensora. Conforme o alumínio é corroído, a reflexão diminui. O sensor demonstrado por Martins-Filho e colaboradores destaca-se principalmente por ser um sistema multiponto capaz fornecer a taxa de corrosão de cada cabeça sensoras a vários quilômetros do OTDR (MARTINS-FILHO et al., 2007).

Wade e colaboradores (2008) apresentaram um sensor de corrosão que se baseia na falha mecânica de fibras ópticas revestidas de metal sob tensão mecânica quando expostas a ambientes corrosivos. Nesse sistema, uma fibra óptica com revestimento de alumínio é submersa em uma solução corrosiva, e o revestimento de vidro da fibra fica exposto após um certo tempo de exposição à corrosão. A remoção do revestimento metálico enfraquece a fibra de sílica, que se rompe sob tensão mecânica. A taxa de ruptura depende de fatores como o nível de estresse e a umidade no ambiente. Quando a fibra se quebra, a transmissão de luz é interrompida, indicando a presença de corrosão (WADE et al., 2008).

Figura 18 – Configuração experimental do sensor de corrosão multiponto. As cabeças sensoras estão enumeradas de 1 à 7. (MARTINS-FILHO et al., 2007)..



Fonte: adaptado de Martins-Filho et al., (2007)

Ainda em 2008, Leung, Wan e Chen desenvolveram um sensor de baixo custo baseado em fibra óptica para monitorar a corrosão do aço em estruturas de concreto armado. O sensor utiliza a técnica de reflectometria óptica no domínio do tempo (OTDR) e consiste em um filme fino de ferro depositado na extremidade de uma fibra óptica por meio da pulverização de íons. Inicialmente, a maior parte da luz é refletida pela camada de ferro na extremidade da fibra. À medida que a corrosão do ferro ocorre, a reflectividade do sinal óptico refletido diminui, permitindo a detecção da corrosão no ambiente de concreto próximo à extremidade da fibra. Esse sensor demonstrou potencial para monitorar a corrosão em diferentes distâncias de uma superfície de concreto exposta a íons cloreto. (LEUNG; WAN; CHEN, 2008).

Com o objetivo de detectar deformações e alterações relacionadas causadas pela expansão decorrente da corrosão das barras de aço em estruturas de concreto, Grattan e colaboradores apresentaram, em 2009, um sistema sensor de tensão mecânica à base de fibra de grades de Bragg (FBG - *Fiber Bragg Grating*) (GRATTAN et al., 2009). As FBGs funcionam medindo a tensão induzida no sensor, o que altera o comprimento de onda da luz refletida ao longo da fibra óptica. Eles conduziram testes de longo prazo em laboratório, avaliando diferentes sensores sob várias condições para determinar seu desempenho. A corrosão foi acelerada intencionalmente em diferentes taxas em vergalhões de aço de alta resistência incorporados em blocos de concreto para esses experimentos. (GRATTAN; SUN, 2000). Os resultados foram comparados com os de sensores eletrônicos, destacando os benefícios do uso de redes de fibra óptica nesses cenários e sua capacidade de fornecer dados quando sensores tradicionais não são eficazes (GRATTAN; SUN, 2000).

Em 2011, Wenbin Hu e colaboradores apresentaram um sensor de monitoramento de corrosão em aço usando uma fibra de grade de Bragg (FBG) revestida com um filme fino de Fe-C (HU et al., 2011). As FBGs possuem uma modulação periódica no índice de refração do núcleo, criada pela exposição do núcleo da fibra à luz ultravioleta, resultando em uma estrutura periódica que reflete luz em um comprimento de onda específico, chamado comprimento de onda de Bragg. Essas FBGs atuam como sensores sensíveis à tensão mecânica e temperatura (HU et al., 2011).

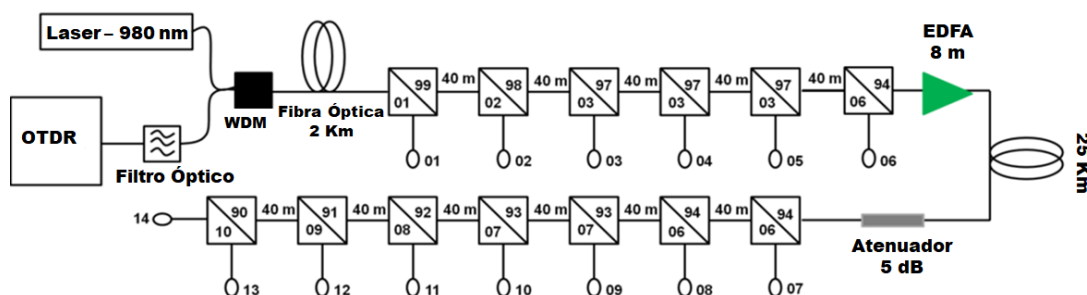
No sensor proposto, a superfície lateral da FBG é metalizada com um filme de prata, sobre o qual é galvanizado um filme de liga de ferro e carbono (Fe-C). A corrosão do filme de Fe-C causa sua expansão devido ao aumento de volume da ferrugem, gerando tensão mecânica na FBG e, conseqüentemente, deslocando o comprimento de onda Bragg. O monitoramento da corrosão é realizado medindo as mudanças no comprimento de onda Bragg por meio de espectroscopia. FBGs sem o filme de Fe-C são usadas como referência para eliminar os efeitos da temperatura (HU et al., 2011).

Em 2011, Nascimento e colaboradores apresentaram e demonstraram experimentalmente o funcionamento de um sensor à fibra óptica de corrosão, multiponto, com sinal OTDR amplificado (NASCIMENTO et al., 2012). O sensor proposto é autorreferenciado e conta com 14 cabeças sensoras, e um estágio de amplificação EDFA, que permite monitorar corrosão em pontos discretos a vários quilômetros de distância do emissor. Acopladores/divisores são usados para direcionar uma pequena fração (1-10%) do sinal óptico às cabeças sensoras, que são conectadas a um equipamento comercial OTDR. Cada cabeça sensora consiste em um prolongamento de fibra óptica monomodo clivada na extremidade onde um filme fino de alumínio é depositado (NASCIMENTO et al., 2012). Conforme o filme metálico é removido devido à reação corrosiva, a luz refletida detectada pelo equipamento OTDR diminui (NASCIMENTO et al., 2012). Desse modo, o acompanhamento das alterações de refletividade da luz no domínio do tempo permite o monitoramento da corrosão e obtenção de taxas para cada ponto de monitoramento. A Figura 19 ilustra o sistema amplificado que utiliza um laser de bombeio de 980 nm e 8 metros de fibra dopada com érbio para construção do EDFA. Os autores mostram que o uso de amplificadores ópticos aumenta o alcance do sensor em dezenas de quilômetro com melhor resolução espacial (NASCIMENTO et al., 2012). Desse modo, com o sistema multiponto amplificado é possível monitorar corrosão para curtas e longas distâncias do equipamento OTDR, tornando o sistema ideal para o monitoramento contínuo de corrosão e erosão como em poços de petróleo em águas profundas, e linhas de fluxo de gás (inclusive da região do pré-sal) (NASCIMENTO et al., 2012). No entanto, sem um estágio de amplificação, é possível monitorar a corrosão em vários pontos apenas à pequenas distâncias (NASCIMENTO et al., 2012).

Em 2014, McCague e colaboradores desenvolveram um sistema de monitoramento do início da corrosão em estruturas de concreto armado usando uma fibra de cristal fotônico birrefringente (PCF) (MCCAGUE et al., 2014). O sistema utiliza um espelho de loop de fibra interferométrico (FLM) para converter as variações de birrefringência da PCF em mudanças no padrão de interferência, que são detectadas por um analisador de espectro óptico (OSA). As alterações nos picos são traduzidas em variações na pressão lateral sobre a PCF, associando-se ao início da formação de ferrugem na superfície da estrutura de aço dentro do concreto armado, permitindo o monitoramento da corrosão em tais estruturas (MCCAGUE et al., 2014).

Um sensor óptico para monitoramento de corrosão do aço em estruturas de concreto, aseado em uma fibra de grade de Bragg revestida com um filme de ferro pulverizado lateralmente,

Figura 19 – Configuração experimental do sensor de corrosão multiponto com OTDR amplificado. As cabeças sensoras então enumeradas de 1 à 14. (NASCIMENTO et al., 2012)..



Fonte: adaptado de Nascimento et al., (2011)

foi desenvolvido em 2015 por Zhang e colaboradores (ZHANG et al., 2015). Nesse sistema, monitoramento da corrosão é realizado medindo o deslocamento do comprimento de onda de Bragg e a diminuição da potência óptica de pico da FBG por meio de um analisador de espectro óptico (OSA). A taxa de corrosão pode ser calculada relacionando o deslocamento do comprimento de onda de Bragg ao tempo e à variação da espessura do metal durante o processo corrosivo, embora o sensor monitore a corrosão em apenas um ponto. (ZHANG et al., 2015).

Em 2016, Aisyah, Hatta e Pratama desenvolveram um sensor de corrosão baseado em uma fibra óptica de estrutura monomodo - multimodo - monomodo (SMS - *Singlemode – Multimode – Singlemode*) (AISYAH; HATTA; PRATAMA, 2016). O sensor usa uma seção de fibra multimodo sem núcleo, com seu revestimento substituído por alumínio, imersa em uma solução corrosiva. As mudanças na espessura do filme metálico devido à corrosão reduzem as perdas por absorção de potência óptica, aumentando o nível de intensidade do sinal transmitido. O sistema monitora a corrosão em um único ponto no final da fibra óptica e fornece informações sobre a cinética do processo corrosivo (AISYAH; HATTA; PRATAMA, 2016).

Em 2017, Almubaied e colaboradores desenvolveram um sensor de corrosão para estruturas de concreto com base em uma Fibra de Grade de Bragg (FBG) nua, conectada diretamente à superfície de uma barra de aço (ALMUBAIED et al., 2017). O sensor monitora a corrosão detectando a pressão expansiva causada pela formação de ferrugem no aço e rachaduras no concreto, usando uma FBG para medir a deformação. Essa abordagem permitiu uma correlação precisa entre o deslocamento do comprimento de onda da FBG e o percentual de corrosão, oferecendo uma indicação precisa do processo corrosivo. Além disso, os custos de fabricação e montagem foram reduzidos em comparação com outros sensores baseados em FBGs, mas a área de detecção é limitada à proximidade do sensor (ALMUBAIED et al., 2017).

Hu e colaboradores (2017) demonstraram experimentalmente um sensor de corrosão que utiliza um polarizador de fibra óptica revestido com uma película de ferro (HU et al., 2017). O

polarizador é uma fibra óptica monomodo polida lateralmente em perfil D, com um filme fino de Fe-C depositado na seção polida. Esse guia de onda revestido com um filme metálico atua como um filtro de modo óptico, permitindo a detecção das alterações na relação de extinção (RE) entre os modos TE e TM, causadas por mudanças na composição do revestimento metálico devido a reações corrosivas. O sensor monitora a corrosão em tempo real durante todo o processo e permite calcular a taxa de corrosão, mas a monitorização é restrita a um único ponto (HU et al., 2017).

Em 2018, Liang Ren e colaboradores propuseram um sistema sensor capaz de monitorar corrosão e vazamentos em vários pontos de um sistema de dutos utilizando a técnica de reflectometria óptica no domínio da frequência (OFDR) (REN et al., 2018). O sensor se baseia na detecção de alterações na tensão mecânica circunferencial causadas pela corrosão ou vazamentos e utiliza sensores de tensão baseados em fibras de grade de Bragg para monitorar essas tensões. Vazamentos causam diminuição na pressão interna dos dutos, resultando em alterações na tensão circunferencial que podem ser detectadas pelos sensores de vazamento. Para distinguir vazamentos da corrosão, os sensores são colocados em pontos distintos ao longo dos dutos. O sistema permite monitorar a resposta dinâmica do processo de vazamento em diferentes locais ao longo da tubulação (REN et al., 2018).

Um sistema sensor distribuído à fibra óptica para monitoramento *insitu* da corrosão de barras de aço em concreto armado foi proposto em 2019 por Fan, Bao, Meng e Chen (FAN et al., 2019). O sensor foi colocado em um padrão de hélice na barra de aço para medir tensões mecânicas expansivas geradas pela corrosão da barra de aço e monitorar o comportamento termomecânico do aço e do concreto. A tecnologia BOTDA foi usada para medir a distribuição de temperatura e tensão mecânica ao longo da fibra óptica. O sensor foi submetido a testes de corrosão acelerada em uma solução de NaCl para avaliar o processo de corrosão. Os dados obtidos foram usados para avaliar a expansão induzida pela corrosão da barra de aço, monitorar rachaduras no concreto e entender o mecanismo de deterioração da estrutura devido à corrosão, bem como desenvolver estratégias para melhorar a durabilidade do compósito aço-concreto a longo prazo (FAN et al., 2019).

Um novo método para avaliar a deterioração do concreto devido à corrosão do aço foi apresentado por Fan e colaboradores, em 2020 (FAN et al., 2020). Eles utilizaram um sensor de fibra óptica distribuída em uma configuração semelhante a um trabalho anterior. Neste estudo, a perda de massa das barras de aço e o volume de produtos de corrosão foram relacionados para analisar o estado da corrosão e seus efeitos na deterioração do concreto armado. Além disso, medições eletroquímicas e de fibra óptica foram realizadas simultaneamente com uma nova configuração, permitindo a avaliação da degradação da interface entre o aço e o concreto em tempo real. Os autores também propuseram um modelo de corrosão para descrever a expansão de volume induzida pelo processo corrosivo (FAN et al., 2020).

Na literatura, também é possível encontrar relatos de estudos recentes, tanto teóricos

quanto experimentais, sobre o monitoramento da corrosão utilizando fibras ópticas (WRIGHT et al., 2021; MA et al., 2021; RAMANI; KUANG, 2021; MA et al., 2021; OLIVEIRA et al., 2021; JÚNIOR; NASCIMENTO; FILHO, 2021).

Wright e colaboradores, em 2021, desenvolveram um sistema sensor para detectar e localizar corrosão interna em dutos de gás natural, com o objetivo de prevenir vazamentos de metano e falhas catastróficas (WRIGHT et al., 2021). O sensor utiliza uma fibra óptica monomodo revestida com filme metálico e um refletômetro óptico de retroespalhamento (OBR) para medir deformações causadas pela dissolução do filme metálico. O OBR fornece informações precisas de localização ao longo da fibra, permitindo o monitoramento contínuo das deformações. O revestimento eletrolítico no sensor gera tensões internas no filme metálico, que, quando liberadas devido à corrosão, resultam em mudanças detectáveis na deformação da fibra óptica. Esse sistema oferece alta precisão e elimina interferências de temperatura e inchaço induzido por água, garantindo resultados mais confiáveis (WRIGHT et al., 2021).

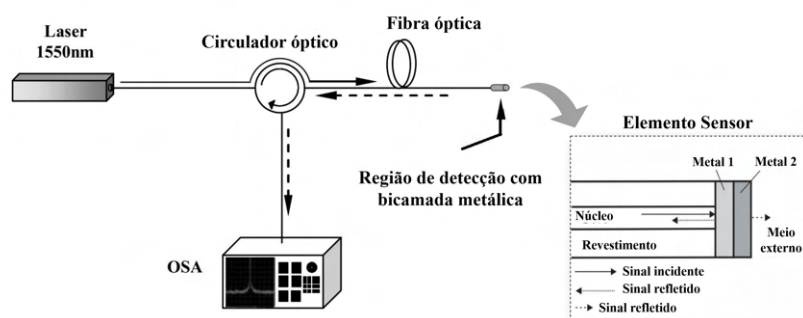
No mesmo ano, Jun Ma e colaboradores desenvolveram um sensor de corrosão por tração utilizando uma Fibra de grade de Bragg (FBG), que permite o monitoramento em tempo real da corrosão de fios de aço (MA et al., 2021). O sensor foi testado em um experimento acelerado de corrosão eletroquímica, demonstrando sua capacidade de detectar com precisão a corrosão leve a moderada nos fios de aço. A estrutura do sensor foi projetada para monitorar e avaliar a corrosão em cabos de aço, sendo uma ferramenta viável e promissora na engenharia de linhas de transmissão. O sensor ajuda a prevenir acidentes e reduzir os períodos de inspeção, contribuindo para a segurança e eficiência dessas estruturas. (MA et al., 2021).

Ramani e Kuang (2021) desenvolveram um sensor de deformação baseado em fibra óptica de plástico (LPOF) para monitorar danos induzidos pela corrosão do aço em estruturas de concreto (RAMANI; KUANG, 2021). Este sensor mede alterações na intensidade da luz refletida e é composto por uma fibra emissora, uma lente esférica, uma fibra receptora e um sistema detector de luz. O processo de medição envolve a convergência da luz da fibra emissora para o ponto focal por meio da lente esférica, antes de ser recebida pela fibra receptora. Alterações na distância entre a lente esférica e a fibra receptora causam mudanças na intensidade da luz transmitida, correlacionadas com a distância relativa por meio de uma curva de calibração. O sensor foi usado para monitorar a resposta de elementos de concreto submetidos a cargas de flexão e testado quanto à sua capacidade de monitorar a corrosão do aço no concreto em um teste de corrosão acelerada. Os resultados permitiram identificar a fase de propagação da corrosão e estimar a extensão do dano causado pela corrosão do vergalhão, o que pode ser útil para prever a vida útil restante das estruturas (RAMANI; KUANG, 2021).

Foi proposto por Oliveira e colaboradores (2021) um novo tipo de sensor de corrosão a fibra óptica que utiliza bicamadas metálicas otimizadas (OLIVEIRA et al., 2021). A fabricação dos dispositivos sensores envolveu a deposição de filmes metálicos finos na superfície clivada da fibra óptica, utilizando a técnica de sputtering. Nessa estrutura, a bicamada metálica afeta o sinal

óptico guiado na fibra óptica, resultando na reflexão de uma fração do sinal, absorção de outra fração e transmissão de uma terceira fração para o meio externo, dependendo da espessura da bicamada. Quando submetido a um processo corrosivo, a bicamada metálica do sensor é afetada, resultando na redução da espessura dos metais e na modulação da intensidade do sinal óptico refletido. Essa modulação pode ser obtida, teoricamente, com base nas equações de Fresnel para reflexão e as informações relativas processo corrosivo podem ser extraídas (OLIVEIRA et al., 2021). O sensor foi caracterizado por simulações e testes experimentais em condições controladas de laboratório usando bicamadas de Ti (10 nm)/Al (10 nm) e Ni (5 nm)/Al (5 nm). A configuração experimental consistiu em um laser de diodo conectado ao sensor em teste e um analisador de espectro óptico (OSA) através de um circulador óptico, conforme ilustrado na Figura 20. Os resultados experimentais indicaram que é possível medir a taxa de corrosão de cada metal individualmente, dependendo das propriedades ópticas e do posicionamento dos filmes na fibra. Além disso, o fim da corrosão da camada metálica externa pode ser identificado, mesmo que as taxas de corrosão dos metais sejam semelhantes, porque o efeito da corrosão na refletância depende do índice de refração do metal. O estudo de Oliveira e colaboradores é de grande importância, pois evidencia que o uso de bicamadas, em vez de monocamadas, melhora o intervalo de medição do sensor, mitigando o problema do período cego encontrado em estruturas de monocamada, e fornece a taxa de corrosão mais cedo durante o processo de corrosão (OLIVEIRA et al., 2021).

Figura 20 – Montagem experimental utilizada para testar o sensor de corrosão com dupla camada metálica (OLIVEIRA et al., 2021).



Fonte: reproduzido de Oliveira et al. (2021).

Nesta seção, foram apresentados vários estudos científicos que abordam sensores de corrosão baseados em fibras ópticas. Diversas técnicas foram destacadas, tais como o monitoramento da potência transmitida ou refletida, além dos diferentes tipos de fibras ópticas utilizadas nesses sensores, como fibras monomodo e multimodo, fibras de grade de Bragg, empregadas em diversas configurações. Na Seção 3.4 serão apresentados alguns sensores multiparâmetros à fibra óptica de temperatura, destacando os sensores ópticos para o monitoramento simultâneo de temperatura e índice de refração.

3.4 SENSORES MULTIPARÂMETROS

As propriedades altamente atrativas das fibras ópticas são amplamente conhecidas e se estendem para os sensores de fibra óptica, os quais apresentam oportunidades para projeto de sensores capazes de medir independentemente e simultaneamente mais de um parâmetro físico ou químico (PEVEC; DONLAGIĆ, 2019). O desenvolvimento de sensores ópticos capazes de medir combinações de grandezas é uma linha de pesquisa promissora, do ponto de vista científico e tecnológico (ALAHBABI; CHO; NEWSON, 2005a; THÉVENAZ et al., 2001; INAUDI; GLISIC, 2005). Isso porque a ideia de monitorar duas ou mais grandezas simultaneamente é tida como interessante, sobretudo quando a natureza das grandezas de interesse estão interligadas, como é o caso da temperatura e do índice de refração. Essas possibilidades foram exploradas com mais intensidade apenas recentemente (PEVEC; DONLAGIĆ, 2019).

A detecção multiparâmetro pode representar um importante avanço nos sistemas de detecção, que pode trazer benefícios em diversas aplicações (PEVEC; DONLAGIĆ, 2019). A capacidade de medir vários parâmetros simultaneamente pode ser fundamental em muitos processos, tais como monitoramento de processos industriais, controle de qualidade em análises químicas, monitoramento ambiental, entre outros. Essa técnica permite que um único dispositivo seja capaz de realizar a medição de diversos parâmetros físicos ou químicos, fornecendo informações precisas e em tempo real sobre o estado do sistema. Além disso, o tamanho compacto dos sensores multiparâmetro possibilita a integração em sistemas menores e mais portáteis, reduzindo o custo e aumentando a eficiência. Ao mesmo tempo, esses sensores também são capazes de realizar medidas precisas por longas distâncias, podendo ser utilizados em sistemas que requerem monitoramento a distância, como em linhas de transmissão de energia elétrica ou em dutos de transporte de petróleo. Assim, a flexibilidade de operação dos sensores multiparâmetro é uma de suas principais vantagens, possibilitando sua aplicação em diferentes cenários e necessidades (SILVA et al., 2021; PEVEC; DONLAGIĆ, 2019).

Um exemplo de aplicação prática é a medição do índice de refração (IR) de um líquido, que pode ser utilizada para determinar sua composição (PEVEC; DONLAGIĆ, 2019). Esse parâmetro é frequentemente medido em processos de controle de qualidade em análises químicas, permitindo a identificação de contaminantes ou adulterantes em amostras. Com um sensor multiparâmetro, é possível combinar a medição do IR com outras grandezas, como a temperatura e a concentração de solutos, fornecendo informações mais completas sobre a amostra. Entretanto, muitos líquidos são altamente sensíveis à temperatura, o que pode dificultar a obtenção de informações precisas sobre a composição líquida apenas por meio da medição do IR, principalmente em ambientes com amplas faixas de temperatura operacional (PEVEC; DONLAGIĆ, 2019). Nesses casos, a temperatura também precisa ser medida para extrair informações precisas sobre a composição líquida. Essa necessidade torna-se ainda mais crítica quando altas resoluções e precisões de medição são necessárias, exigindo um conhecimento muito preciso tanto do IR quanto da temperatura da amostra medida. Em muitas situações, a solução

para esse problema é o uso de sensores multiparâmetro compactos, especialmente quando esses sensores são utilizados em ambientes de temperatura menos controlada, comuns em aplicações fora do laboratório (PEVEC; DONLAGIĆ, 2019). Dessa forma, os sensores multiparâmetro oferecem uma solução eficiente e precisa para a medição de múltiplos parâmetros em ambientes complexos e desafiadores, proporcionando informações mais completas e confiáveis sobre as amostras medidas.

O monitoramento contínuo de estruturas é fundamental na sociedade moderna para evitar acidentes como o colapso súbito da ponte I-35W do rio Mississippi, em Minnesota (EUA), em 2007 (UKIL; BRAENDLE; KRIPPER, 2011). Por isso, sensores instalados em estruturas de concreto, por exemplo, permitem o monitoramento contínuo da estrutura e indicam danos incipientes, que são difíceis de serem capturados por inspeção humana, mas que podem resultar em falhas catastróficas. Para isso, diversas tecnologias têm sido propostas, incluindo sensores para o monitoramento simultâneo de temperatura e tensão mecânica, pressão ou deformação (UKIL; BRAENDLE; KRIPPER, 2011). As técnicas para discriminação da temperatura e tensão podem ser baseadas em modos de polarização, modos espaciais e comprimento de onda (JONES, 1997). Na literatura, portanto, são descritos predominantemente sensores de temperatura e tensão baseados em interferometria (SINGH; SIRKIS, 1997; WU et al., 2011; RAN et al., 2013; BIAN et al., 2016; OUYANG et al., 2017), fibras ópticas com grades inscritas (FRAZAO; SANTOS, 2004; HAN et al., 2005; RAJINIKUMAR et al., 2008; AASHIA; ASOKAN, 2009; MONDAL et al., 2009; ZHOU et al., 2009), combinações desses elementos e suas derivações (DU; TAO; TAM, 1999; RAO et al., 2007; KIM et al., 2008; LIU et al., 2014; DONG et al., 2010), o que possibilita um monitoramento mais preciso e confiável das estruturas.

Além das técnicas baseadas em interferometria e fibras ópticas com grades inscritas, também são relatados na literatura diversos sistemas de detecção simultânea de tensão mecânica, pressão ou deformação juntamente com a temperatura baseados no efeito de retroespalhamento Brillouin em fibras ópticas (PARKER et al., 1997; HAN et al., 2005; SMITH et al., 1999; BROWN; BROWN; COLPITTS, 2006; ZOU; HE; HOTATE, 2010; WANG et al., 2018; LANTICQ et al., 2008; LI et al., 2018; ZRELLI, 2019; LANCIANO; SALVINI, 2020; BAO; ZHOU; WANG, 2021; PENG et al., 2021). Esses sistemas exploram a interação entre a luz e a matéria na fibra óptica para medir simultaneamente a temperatura e a tensão mecânica em pontos específicos da estrutura. Eles são particularmente úteis em ambientes de alta temperatura ou alta tensão, onde outras técnicas podem não ser viáveis. A primeira descrição de um sistema de detecção distribuída de temperatura e tensão mecânica baseado em Espalhamento Brillouin foi feita por Parker e colaboradores, em 1997 (PARKER et al., 1997). No espalhamento Brillouin, a frequência da luz espalhada é modulada pelas mudanças de temperatura e deformação (ZAGHLOUL et al., 2018). Como a mudança da frequência é uma combinação linear da temperatura e da tensão, a discriminação das grandezas é um desafio e requer métodos eficientes para tratar essa sensibilidade cruzada (ZAGHLOUL et al., 2018). Comumente, os sensores baseados em espalhamento Brillouin são interrogando a partir do

método análise no domínio de tempo de Brillouin (BOTDA- Brillouin optical time-domain analysis) (LI et al., 2018). Tais sensores têm uma qualidade única, que é a capacidade de fazer medidas totalmente distribuídas de deformação e temperatura (PARKER et al., 1997). Um exemplo desses sensores é relatado por Lanticq e colaboradores, em 2008 (LANTICQ et al., 2008). Os autores apresentaram e demonstraram experimentalmente um sensor à fibra óptica distribuído baseado em Brillouin incorporado em estruturas de concreto para monitorar a temperatura e a deformação (LANTICQ et al., 2008). Este sensor foi testado em fibras ópticas monomodo e mantenedora de polarização em uma viga de concreto armado de 3 metros de comprimento sob carga de tração e compressão. O deslocamento Brillouin foi medido usando um refletômetro óptico no domínio de tempo Brillouin (BOTDR) operando a um comprimento de onda de 1,55 nm. Os resultados mostraram conformidade com medidas de referência e indicaram promissoras aplicações para o monitoramento contínuo da saúde de estruturas (LANTICQ et al., 2008).

Em 2020, Sheng e colaboradores desenvolveram um sensor multiparâmetro para medição distribuída de temperatura e deformação usando o espalhamento espontâneo de Brillouin em uma fibra óptica revestida com poliimida (SHENG et al., 2020). Essa abordagem resolve o problema de sensibilidade cruzada em redes de detecção Brillouin convencionais. A fibra de poliimida possui múltiplos modos acústicos com diferentes coeficientes de temperatura e deformação, resultando em diferentes picos de Brillouin com variações na temperatura e tensão mecânica no ambiente. Usando um sinal óptico de referência e a Transformada de Fourier, os deslocamentos de frequência de Brillouin permitem a medição simultânea de temperatura e tensão com alta precisão, alcançando uma precisão de 1,02°C na temperatura e uma distância de até 2,5 km (SHENG et al., 2020).

Leijun Hu e colaboradores (2021) propuseram uma estratégia para o monitoramento distribuído simultâneo de tensão mecânica e temperatura usando o espalhamento espontâneo em uma fibra de comunicação comum e dois amplificadores de fibra dopada com érbio (HU et al., 2021). A fibra utilizada possui modos acústicos com coeficientes de ganho de Brillouin desiguais no núcleo, o que permite explorar as diferenças de temperatura e sensibilidade à deformação entre os diferentes picos de Brillouin (Hu et al., 2021). Com esse sistema, eles conseguiram alcançar uma precisão na medição de temperatura de 1,13°C em uma faixa de medição de 21,8 km, permitindo a demodulação simultânea da informação de deformação e temperatura (HU et al., 2021).

Também foram relatados sistemas de alta performance que combinam o uso de pré-amplificação óptica no receptor, técnicas de codificação de pulso óptico e um formato de modulação otimizado para estender efetivamente o alcance de detecção dos sensores de análise de domínio de tempo óptico de Brillouin (DONG; CHEN; BAO, 2010; SOTO; BOLOGNINI; PASQUALE, 2011; SOTO et al., 2012).

Diversos estudos propuseram a utilização combinada do espalhamento espontâneo Raman

ou Rayleigh e Brillouin para medições distribuídas de temperatura e tensão mecânica (BROWN; BROWN; COLPITTS, 2006; CHEN et al., 2012; TAVERNER; NORTON, 2009; ROSSETTO et al., 2000; ALAHBABI; CHO; NEWSON, 2004; AMIRA; MOHAMED; TAHAR, 2016; MURRAY et al., 2023). Um desafio significativo do sistema sensor baseado em Brillouin é a sensibilidade cruzada, que requer a utilização de técnicas de compensação e distinção complexas para identificar qual parâmetro causou a mudança (BROWN; BROWN; COLPITTS, 2006). Como resultado, esses sensores são normalmente usados em áreas onde apenas um parâmetro é alterado (BROWN; BROWN; COLPITTS, 2006). Para superar essa limitação, é possível utilizar uma abordagem híbrida combinando os efeitos de espalhamento Raman e Brillouin. Os sensores Raman-Brillouin usam os sinais retroespalhados Brillouin para monitorar perturbações mecânicas e os sinais retroespalhados Raman para monitorar temperatura, permitindo a detecção simultânea de ambos os parâmetros em uma única fibra (ALAHBABI; CHO; NEWSON, 2004) ou em um par de fibras usando a técnica B-OTDR (BROWN; BROWN; COLPITTS, 2006). O primeiro sensor capaz de medir simultaneamente tensão mecânica e temperatura usando a dispersão de Brillouin e Raman foi relatado por Alahbabi e colaboradores em 2004 (ALAHBABI; CHO; NEWSON, 2004).

Muitos sensores têm sido desenvolvidos para monitoramento de temperatura, tensão mecânica ou pressão usando a tecnologia de Fibra de Grade de Bragg (FBG - Fiber Bragg Grating) (PATRICK et al., 1996; KERSEY; PATRICK, 1999; CHEHURA; JAMES; TATAM, 2007; WU et al., 2019; LI; WANG; WEN, 2016; ZHU et al., 2019; YAN; LIU; GU, 2017; FAJKUS et al., 2016; CHEHURA; JAMES; TATAM, 2007). Nessa técnica, uma fonte de luz ultravioleta ilumina a fibra óptica transversalmente, enquanto uma máscara de fase gera um padrão de interferência no núcleo da fibra, induzindo uma modulação espacial local e periódica do índice de refração do núcleo da fibra, criando uma estrutura ressonante (WU et al., 2019). A grade de Bragg atua como um filtro espectral de reflexão que seleciona um comprimento de onda, conhecido como comprimento de onda de Bragg, da banda de comprimento de onda transmitida na fibra óptica (WU et al., 2019). Qualquer perturbação na periodicidade da grade altera o comprimento de onda de Bragg, que é detectado pela luz que se propaga pela grade. Assim, as FBGs são altamente sensíveis a tensões, pressão, deformação e variações de temperatura (WU et al., 2019; MAHESHWARI et al., 2017).

No entanto, a tecnologia de detecção baseada em FBG de fibra óptica também apresenta um problema de sensibilidade cruzada entre a temperatura e outros parâmetros (WU et al., 2019; MAHESHWARI et al., 2017). Essa sensibilidade cruzada frequentemente requer a utilização de sistemas de interrogação volumosos e dispendiosos, além de estruturas adicionais que ajudam a demodular adequadamente os parâmetros medidos (JONES, 1997; RAMAKRISHNAN et al., 2016). Geralmente, a discriminação da temperatura e da tensão mecânica em sensores de FBG é baseada na utilização de duas grades em série: uma isolada das tensões, derivando dois comprimentos de onda do mesmo elemento sensor com base na dispersão diferencial do comprimento de onda dos dois parâmetros usando duas grades sobrepostas; e na utilização de

grades diferentes, como FBGs com revestimento cônico ou diâmetros de revestimento diferentes (JONES, 1997, 1997).

Um exemplo de sensor de temperatura e tensão mecânica baseado em FBGs em cascata foi apresentado por Wu e seus colaboradores em 2019 (WU et al., 2019). Nesse sistema, foram utilizadas FBGs banhadas a ouro e FBGs com revestimento de acrílico para medições simultâneas de tensão axial e temperatura.

A medição simultânea de temperatura e umidade é amplamente aplicável em diversas áreas, como diagnósticos climáticos, monitoramento ambiental, controle industrial, controle de qualidade de alimentos, sistemas de conforto ambiental interno, saúde, entre outras (ARREGUI et al., 2002; CHEN et al., 2000; PUTTEN et al., 2000). Para atender a essas aplicações, são necessários sensores pequenos, leves e imunes a interferências eletromagnéticas, o que torna os sensores de fibra óptica ideais para essas finalidades (ARREGUI et al., 2002). Nesse sentido, diversos sensores à fibra óptica capazes de monitorar simultaneamente foram relatados baseados em diferentes métodos (ARREGUI et al., 2002; KAWAMURA et al., 1999; SUN et al., 2014; TAN et al., 2013; LIU et al., 2013; ARREGUI et al., 2002; URRUTIA et al., 2016; ZHANG et al., 2010). A detecção em sensores de umidade e temperatura baseados em fibra óptica é realizada por meio da medição de parâmetros ópticos, tais como comprimento de onda, intensidade, refletividade ou polarização, que sofrem modulações em resposta às mudanças desses parâmetros (SUN et al., 2014).

Os sensores de umidade relativa típicos de fibra óptica incluem sensores baseados em acoplamento de ondas evanescentes, fibra de grade de longo período (LPG), fibra de grade de Bragg (FBG), e sensor de fibra óptica de plástico (LIU et al., 2013, 2013; TAN et al., 2013; SUN et al., 2014; ALWIS; SUN; GRATTAN, 2015; PEVEC; DONLAGIC, 2015; OSUCH et al., 2015). Uma combinação de elementos sensores sensíveis às alterações de temperatura, como sensores de FBG, é necessária para o monitoramento simultâneo da temperatura (SUN et al., 2014). Devido ao fato de que as fibras de sílica têm baixa sensibilidade à umidade, geralmente é necessário revestir ou depositar materiais sensíveis à umidade nos sensores de LPG e FBG ou em outros sensores com estruturas de fibra diferentes, a fim de melhorar a sensibilidade à umidade (SUN et al., 2014). No entanto, o revestimento ou deposição de alguns materiais, como polímeros, pode não apenas tornar a fabricação do sensor complexa, mas também introduzir sensibilidade cruzada à temperatura devido à expansão térmica dos polímeros aplicados (SUN et al., 2014; TAN et al., 2013). Como resultado, a sensibilidade cruzada é frequentemente um problema na implementação desse tipo de sensor (SUN et al., 2014).

Em 2002, Arregui e Cooper desenvolveram um sensor que monitora simultaneamente temperatura e umidade. Esse sistema utiliza fibras ópticas monomodo com duas cabeças sensoras: uma fibra de grade de Bragg e uma cavidade interferométrica Fabry-Perot em cascata (ARREGUI et al., 2002). A cavidade Fabry-Perot é revestida com um material sensível à umidade, enquanto a fibra de grade de Bragg monitora a temperatura. A detecção da umidade é baseada na mudança

na potência óptica refletida devido à umidade nos materiais sensíveis, que formam as cavidades interferométricas. A medição da temperatura é realizada pelo deslocamento do comprimento de onda de Bragg no espectro do sinal transmitido. Por meio de um analisador de espectro óptico, é possível obter curvas de potência óptica refletida em relação à umidade e medir a resposta espectral dependente da temperatura. Esse método de detecção depende da potência óptica refletida gerada pela umidade em materiais específicos que formam cavidades interferométricas (ARREGUI et al., 2002).

Em 2016, Urrutia e colaboradores desenvolveram um sensor de umidade e temperatura baseado em uma grade de longo período em uma fibra óptica, usando variações no filme revestido para detectar mudanças na resposta óptica do sensor (URRUTIA et al., 2016). O sensor proporciona respostas simultâneas para umidade e temperatura por meio da análise do espectro de transmissão de comprimento de onda duplo (URRUTIA et al., 2016).

O monitoramento do índice de refração é de grande importância para muitas aplicações químicas e biológicas (LIAO et al., 2010). Uma preocupação importante na implementação de sensores de IR é a sensibilidade cruzada da temperatura, que pode levar a uma medição não confiável devido à forte influência da temperatura no índice de refração (LIAO et al., 2010; VELÁZQUEZ-GONZÁLEZ et al., 2017). Para reduzir a incerteza de medição do índice de refração devido à perturbação da temperatura, a abordagem comum envolve a medição simultânea de ambos os parâmetros (VELÁZQUEZ-GONZÁLEZ et al., 2017). Em esquemas simples, nos sensores de IR e temperatura, a cabeça sensora é composta por um par em cascata ou dispositivos de fibra óptica incorporados, com boa sensibilidade a esses dois parâmetros (VELÁZQUEZ-GONZÁLEZ et al., 2017). Os sensores de fibra óptica para medição simultânea de IR e temperatura podem ser alcançados por: (a) empregando um único elemento sensor, como FBG inclinada, fibra tipo-D de alta birrefringência, Interferômetro de Fabry-Pérot intrínseco ou Mach-Zehnder (ZHAO et al., 2006; BAPTISTA et al., 2008; RAO et al., 2008; SHU et al., 2001); com (b) adoção de uma combinação de múltiplos elementos sensores, como uma estrutura híbrida de FBG e GPL, uma estrutura sanduíche de GPL, FBGs duplos conectados por fibra multimodo cônica, ou um par de FBGs revestidos com diferentes polímeros (ZHANG et al., 2005; SHAO et al., 2007; MEN; LU; CHEN, 2008; PARK et al., 2008; LIAO et al., 2010; GWANDU et al., 2002); entre outros.

Em 2014, Simon Pevec e Denis Donlagic propuseram um sistema de sensor óptico em fibra óptica com interferômetros Fabry-Perot (FPIs) empilhados para medir independentemente o índice de refração e a temperatura de fluidos com alta resolução (PEVEC; DONLAGIC, 2014). O sensor em miniatura, feito inteiramente de sílica, consiste em dois FPIs construídos na ponta de uma fibra óptica de sílica, formando um interferômetro de três feixes (PEVEC; DONLAGIC, 2014).

Em um estudo subsequente, Pevec e Donlagic (2018) apresentaram um sistema de sensor para detecção de gases com resolução otimizada, utilizando o empilhamento de interferômetros

Fabry-Perot (FPIs) otimizados a partir da estrutura anterior (PEVEC; DONLAGIC, 2018; PEVEC; DONLAGIC, 2014). Eles consideraram os efeitos da temperatura e da pressão dos gases, além de analisar as relações entre as propriedades do interrogador de sinal e o comprimento ótimo da cavidade Fabry-Perot (PEVEC; DONLAGIC, 2018)

Outros sensores multiparamétricos de fibra óptica, que possibilitam a detecção simultânea de temperatura e índice de refração, foram descritos na literatura, usando interferômetros Fabry-Perot como base (PEVEC; DONLAGIC, 2014; PEVEC; DONLAGIC, 2015; PEVEC; DONLAGIC, 2018; PEVEC; DONLAGIC, 2017). Além disso, a utilização de cascatas de interferômetros Fabry-Perot, e combinação com outras tecnologias, também foi relatada para detecção simultânea de pressão e temperatura (LI; ABEYSINGHE; BOYD, 2004; PEVEC; DONLAGIC, 2012; PANG et al., 2013; BAE et al., 2014; YIN et al., 2014b; ZHANG et al., 2014; XU et al., 2016; JIAO et al., 2017), tensão mecânica e temperatura (SINGH; SIRKIS, 1997; OUYANG et al., 2017; RAN et al., 2013), umidade relativa e temperatura (PEVEC; DONLAGIC, 2015). Em muitos desses sistemas, uma abordagem comum envolve o uso de uma cavidade para medir um parâmetro de forma independente, enquanto outra cavidade ou dispositivo é empregado para eliminar a dependência cruzada entre as grandezas de interesse.

Os interferômetros Fabry-Perot (FPIs) são frequentemente considerados ideais para sensores multiparâmetros de fibra óptica devido à sua capacidade de detectar vários parâmetros físicos e químicos (PEVEC; DONLAGIC, 2019). Eles podem ser empilhados para formar sistemas eficientes, como um sensor de quatro parâmetros feito de sílica para medição simultânea de condutividade térmica, pressão, índice de refração e temperatura de gases. No entanto, a implementação enfrenta desafios, incluindo complexidade de projeto e fabricação, alto custo, sensibilidade a vibrações e necessidade de interpolação de dados para aumentar a resolução, que pode levar a erros de medição (PEVEC; DONLAGIC, 2019).

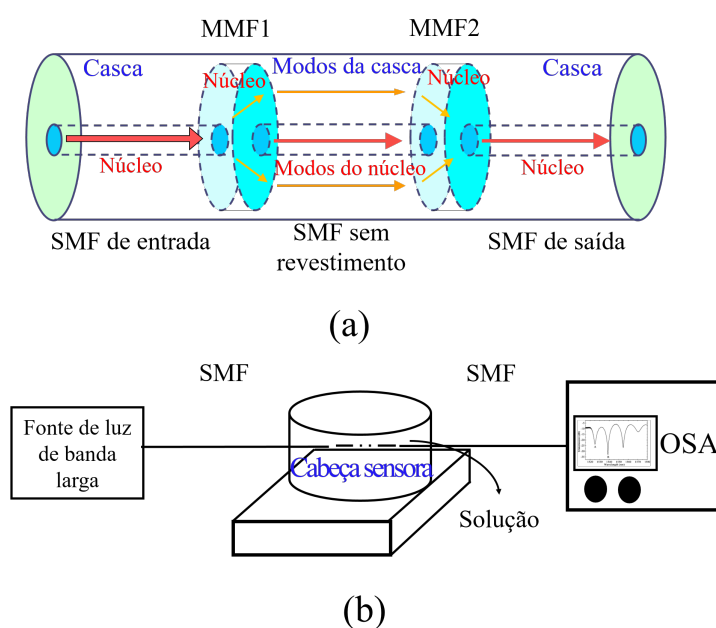
A literatura apresenta uma abundância de sensores multiparâmetros que medem temperatura e índice de refração, baseados em interferômetros Mach-Zehnder de fibra. Esses sensores são populares devido à sua fabricação simples em comparação com outros sistemas interferométricos, como os FBIs, e à sua flexibilidade para implementar várias configurações interferométricas em cascata, ampliando suas aplicações em diversas áreas. As técnicas mais comuns incluem o uso de um único MZI ou uma cascata de MZIs para medições multiparâmetros.

Um único sensor MZI (Interferômetro Mach-Zehnder) é capaz de medir simultaneamente as variações no índice de refração e temperatura. Isso ocorre devido à interferência de múltiplos modos de luz em uma seção de guia de onda, onde a interação evanescente com o meio afeta as constantes de fase dos modos. Essas mudanças nas constantes de fase resultam em modulações distintas na resposta espectral do sensor, permitindo a medição precisa das alterações no índice de refração do meio em teste. Além disso, o sensor MZI pode medir a temperatura devido às propriedades termo-ópticas do material na seção de guia de onda. Mudanças na temperatura levam a variações no comprimento da seção de guia de onda, afetando as constantes de fase dos

modos de luz e, conseqüentemente, a resposta espectral do sensor. Assim, é possível projetar um MZI com sensibilidades distintas para índice de refração e temperatura e resolver essas medições de forma independente (PEVEC; DONLAGIĆ, 2019).

Um exemplo de sensor de medição simultânea de índice de refração e temperatura com base em um único MZI de fibra óptica foi proposto e experimentado por Rui Xiong e colaboradores (XIONG et al., 2014). Esse sensor consiste na junção de duas fibras multimodo (MMF) entre três fibras monomodo (SMF). As fibras multimodo atuam como acopladores de modo para dividir e recombinar a luz devido à diferença de diâmetro do núcleo, como pode ser observado na Figura 21. Quando a luz de uma fonte de banda larga é lançada na primeira fibra multimodo (MMF1), ocorre interferência entre os modos do núcleo e os modos do revestimento com diferentes constantes de propagação. O sensor foi avaliado ao ser imerso em um líquido sob teste com temperatura controlada, e o espectro de transmissão foi registrado por um Analisador de Espectro Óptico (OSA) (XIONG et al., 2014).

Figura 21 – Diagrama esquemático do (a) elemento sensor proposto e (b) sistema experimental baseado em interferômetros de fibra Mach-Zehnder (XIONG et al., 2014).



Fonte: Adaptado de Xiong e Colaboradores (2014).

O aumento do índice de refração no ambiente ao redor da fibra óptica não revestida (SMF) leva a um aumento do índice de refração efetivo do revestimento, resultando em deslocamentos das quedas de transmissão para comprimentos de onda mais curtos (XIONG et al., 2014). Já o aumento da temperatura ambiente provoca deslocamentos das quedas de transmissão para comprimentos de onda mais longos. Esses deslocamentos são específicos para diferentes modos de revestimento, permitindo a medição simultânea do índice de refração e da temperatura ao monitorar a mudança em duas quedas de transmissão específicas. O sistema sensor proposto por

Xiong e colaboradores é altamente sensível, com valores de sensibilidade de $-37,9322$ nm/unidade de índice de refração e $0,0522$ nm/°C para índice de refração e temperatura, respectivamente. Além disso, opera em uma ampla faixa de índice de refração de 1,3105 a 1,3517 e na faixa de temperatura de 25°C a 85°C (XIONG et al., 2014).

O comprimento da fibra monomodo (SMF) desempenha um papel fundamental no desempenho do sensor de interferência modal. A escolha do comprimento correto afeta a faixa espectral livre do sensor, sua capacidade de operar sem interferência de outros sinais ópticos e sua sensibilidade. A otimização do comprimento da SMF é crucial para desenvolver sistemas sensores altamente sensíveis e seletivos (XIONG et al., 2014).

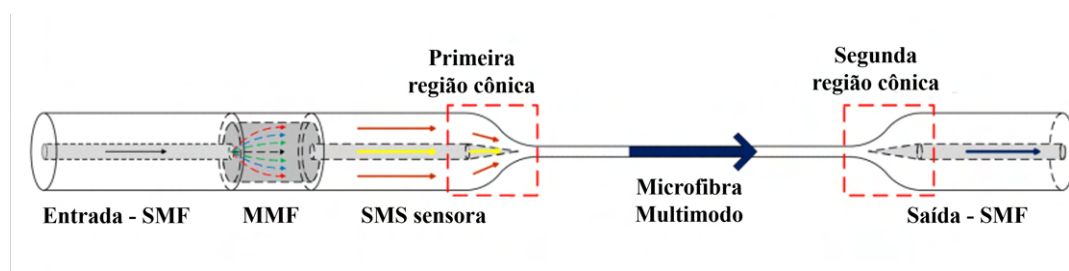
Existem vários estudos na literatura que abordam o desenvolvimento de sensores de temperatura e índice de refração baseados na interferência entre caminhos ou modos em fibras ópticas (LI et al., 2010; KIM; HAN, 2011; LIAO; CHEN; WANG, 2014; XIONG et al., 2014; SU et al., 2014; LIU; WANG; ZHANG, 2016; WANG et al., 2016; ZHANG et al., 2016; XIONG et al., 2016; ZHAO et al., 2017). Esses estudos se diferenciam principalmente pelas características dos elementos utilizados para criar um MZI (Interferômetro de Mach-Zehnder), tais como comprimento e número de seções de fibras ópticas diferentes e os revestimentos utilizados nessas fibras. Essas variações no design têm como objetivo alcançar um acoplamento adequado dos modos de luz nas fibras, permitindo que ocorra a interferência entre os caminhos ópticos. Alguns estudos têm se concentrado em melhorar a eficiência do acoplamento de modo por meio da utilização de revestimentos especiais ou pelo uso de fibras ópticas com geometrias diferentes, como estruturas em fibra com perturbação locais causadas por microesferas (SU et al., 2014), cavidades de ar internas (LIAO; CHEN; WANG, 2014; LIU; WANG; ZHANG, 2016; ZHANG et al., 2016), cone de fibra de dupla passagem (LI et al., 2010), e até mesmo combinações dessas estruturas (XIONG et al., 2016; WANG et al., 2016). Outros trabalhos exploram a utilização de fibras de manutenção de polarização ou com núcleos graduados, o que permite o acoplamento de modos de luz com diferentes perfis de campo transversal, aumentando assim a sensibilidade do sensor (KIM; HAN, 2011; ZHAO et al., 2017).

Nos sistemas em que uma cascata de dois MZI são utilizados, é comum que um deles seja sensível apenas à temperatura, enquanto o outro seja sensível tanto ao índice de refração quanto à temperatura. Isso ocorre porque, na maioria das vezes, a sensibilidade à temperatura do MZI que detecta o índice de refração é inevitável, devido à sensibilidade intrínseca à temperatura da fibra óptica e do fluido (PEVEC; DONLAGIĆ, 2019). Sensores de temperatura e IR baseados em cascata de MZI podem ser alcançados a partir de emendas de fibras com campos modais diferentes (CHEN et al., 2015; TONG et al., 2014).

Luo e colaboradores (2015) desenvolveram um sensor de temperatura e índice de refração baseado em duas estruturas de fibras ópticas monomodo e multimodo em cascata, com um guia de onda cônico criado por afunilamento em uma das estruturas (LUO et al., 2015). O sensor utiliza dois interferômetros Mach-Zehnder (MZI): o primeiro atua como sensor de temperatura e

o segundo é sensível ao índice de refração. As medições de índice de refração e temperatura são obtidas através do deslocamento do comprimento de onda no espectro de transmissão óptica. O sensor demonstrou alta sensibilidade, com valores de $-23,67$ nm/unidade de índice de refração e $81,19$ pm/°C no primeiro MZI, e $3820,23$ nm/unidade de índice de refração e $-465,7$ pm/°C no segundo MZI (LUO et al., 2015). A Figura 22 apresenta a estrutura do sensor proposto por Luo et al.

Figura 22 – Sensores de temperatura e RI baseados em SMF-MMF-SMF alongados com uma região cônica (LUO et al., 2015).



Fonte: Adaptado de Luo et al. (2015).

A interferência entre modos resultante de uma heteroestrutura de fibra também foi empregada para medição simultânea de deformação, pressão ou curvatura e temperatura (BOCK; EFTIMOV, 1994; WU et al., 2011; BIAN et al., 2016). Hu et al. (2011) realizaram um experimento demonstrando um sistema sensor que utiliza duas seções de fibra multimodo para formar um interferômetro de Mach-Zehnder. Nesse sistema, ao medir dois comprimentos de onda de pico, é possível determinar a deformação e a temperatura de forma independente utilizando um único MZI (WU et al., 2011). Jicheng Bian et al. (2019) também propuseram um sensor de fibra baseado no interferômetro de Mach-Zehnder com o mesmo propósito, mas, nesse caso, o sensor de fibra foi construído inserindo uma seção reta de fibra mantenedora de polarização entre duas estruturas em formato de "amendoim" (BIAN et al., 2016).

Também foram relatados estudos que apresentam sensores de temperatura e RI baseados em diferentes configurações MZI e combinado a outras estruturas, como a combinação de interferômetro Mach-Zehnder com deslocamento de núcleo e FBG, relatado por Yao et al. (2014), Mach-Zehnder de fibra em cascata baseado em duplas cavidades de ar internas e fibra cônica, como proposto por Liu e colaboradores (2016), e interferômetro Mach-Zehnder de fibra não balanceada construído a partir do sanduíche de fibras de grades de longo período, como proposto por Zhang e colaboradores (2016) (YAO et al., 2014; LIU; WANG; ZHANG, 2016; ZHANG et al., 2005).

A combinação de diferentes tipos de interferômetros tem sido explorada na construção de sensores de fibra óptica para a detecção de temperatura e índice de refração (ZHAO et al., 2016; SUN et al., 2013; KIM et al., 2005). Essa abordagem é atraente porque interferômetros distintos podem fornecer respostas não interferem entre si, permitindo obter um método de demodulação

mais fácil e reduzindo interferências indesejadas (ZHAO et al., 2016). Zhao e colaboradores propuseram e demonstraram um novo sensor para medição de índice de refração e temperatura de alta sensibilidade baseado em interferência composta. Para isso, os autores implementaram uma cascata da estrutura tradicional de fibra monomodo (SMF) - fibra de núcleo oco (HCF) - fibra de cristal fotônico (PCF) - fibra monomodo, que forma um interferômetro Fabry-Perot (FPI) e, ao mesmo tempo, forma um interferômetro Mach-Zehnder (ZHAO et al., 2016).

Li e colaboradores (2017) desenvolveram um sensor simultâneo de duplo parâmetro para medir temperatura e campo magnético (LI et al., 2017). O sensor combina um interferômetro Fabry-Pérot preenchido com um fluido magnético e um interferômetro Mach-Zehnder preenchido com etanol. A medição simultânea desses parâmetros é realizada monitorando os espectros refletidos do interferômetro Fabry-Pérot e os espectros transmitidos do interferômetro Mach-Zehnder. Os comprimentos de onda característicos desses espectros são diretamente proporcionais ao campo magnético aplicado e à temperatura (LI et al., 2017).

Sensores multiparâmetros que permitem a medição simultânea de índice de refração (RI) e temperatura podem ser construídos usando as Fibras de Grade de Bragg (FBG) (ECKE et al., 1999; IADICICCO et al., 2005; ZHAO et al., 2006; CHEN et al., 2011; YANG et al., 2015). Para alcançar essa detecção simultânea, é possível expor o núcleo da fibra com uma grade gravada ao meio do teste. Uma proposta de sistema sensor baseado em FBG polida lateralmente para monitorar distribuições de índice de refração e temperatura em fluidos foi feita por Ecke e colaboradores (ECKE et al., 1999). Uma técnica semelhante foi descrita por Chen e colaboradores (2011), em que toda a seção da grade é polida e, em seguida, metade de seu comprimento é coberta pelo material líquido sob teste, resultando em picos duplos no espectro de Bragg (CHEN et al., 2011). Isso permitiu medições simultâneas de índice de refração e temperatura.

Além das Fibras de Grade de Bragg convencionais, outras variações, como as FBGs inclinadas e as Fibras de Grade de Bragg de Longo Período (LPFBG), são frequentemente utilizadas em sensores multiparâmetros para medição de temperatura e índice de refração (GWANDU et al., 2002; ZHU; RAO; MO, 2005; CHEN et al., 2005; ZHAO et al., 2006; YAN et al., 2007; WONG et al., 2010b; ALBERTO et al., 2011; ENRÍQUEZ; CRUZ; GIRALDI, 2012; HAN et al., 2012; BERRETTONI et al., 2015; ZHU et al., 2022). Adicionalmente, a combinação de FBGs convencionais e LPFBGs é frequentemente considerada uma abordagem interessante, pois permite adotar um esquema simples de interrogação de sensores, dentre outras vantagens (PEVEC; DONLAGIĆ, 2019)

Em comparação às FBGs padrão, as FBGs inclinadas proporcionam uma sensibilidade relativamente alta ao índice de refração, sem necessidade de intervenção adicional na geometria da fibra em que são inscritas (ALBERTO et al., 2011; ZHAO et al., 2006; PEVEC; DONLAGIĆ, 2017). A variação de temperatura pode ser determinada pelo deslocamento direto do comprimento de onda do modo Bragg retrorrefletido, enquanto o índice de refração altera os comprimentos

de onda de ressonância associados ao acoplamento entre os modos fundamental e revestimento (PEVEC; DONLAGIC, 2017). Por outro lado, as LPFBGs possuem uma modulação periódica mais suave em comparação com as FBGs convencionais, o que resulta em um perfil de resposta espectral mais largo. Essas FBGs são interessantes para aplicações em sensores multiparâmetros, pois a largura do perfil de resposta permite medir diferentes parâmetros simultaneamente, como temperatura, deformação e índice de refração (HAN et al., 2012). No entanto, devido à grande sensibilidade cruzada térmica inerente ao índice de refração, sensores baseados nessa estrutura exigem um mecanismo de compensação de temperatura para uma medição precisa.

Foram propostas várias abordagens para detecção simultânea de temperatura e índice de refração baseada em LPFBGs. Essas abordagens incluem a utilização de uma LPFG gravada em uma fibra monomodo padrão emendada a uma fibra duplamente revestida (HAN et al., 2012), a utilização de um par de LPFBGs com diferentes períodos inscritos lado a lado em uma única peça de fibra de revestimento duplo (GWANDU et al., 2002), a utilização de LPFBGs com diferentes períodos de grade inscritos em uma fibra monomodo (YAN et al., 2007) e o uso de um único LPFBG ultra longo que possui múltiplos picos de ressonância (ZHU; RAO; MO, 2005). Em todas essas abordagens, os períodos das LPFBGs foram selecionados de forma que um dos LPFBGs acopla o modo do núcleo com os modos do revestimento interno, enquanto o outro acopla o modo do núcleo com os modos do revestimento externo. Essa escolha de períodos garante que um dos LPFBGs seja sensível apenas à temperatura, enquanto o outro é sensível à temperatura e ao índice de refração. Com isso, é possível obter medições simultâneas confiáveis de ambos os parâmetros.

A utilização de redes de Bragg em fibra óptica (convencionais ou suas variações) em esquemas de detecção multiparâmetros também tem sido relatada para combinação de outras grandezas, como rotação e deslocamento (KISAŁA; HARASIM; MROCZKA, 2016), torção e temperatura (YU et al., 2014), nível de líquidos e temperatura (OSUCH et al., 2015), deslocamento e temperatura (YU et al., 2000; ZHANG et al., 2001; TAO; DONG; LAI, 2016), curvatura e temperatura (HAN et al., 2006; SUN et al., 2007; XU et al., 2010), força e temperatura (XU et al., 2010; GUO et al., 2005). Na maioria desses sistemas, detecção do parâmetro duplo é alcançada devido às diferentes respostas dos modos de revestimento e do modo de núcleo no espectro da luz refletida na estrutura de grade.

É possível obter a detecção simultânea de temperatura e índice de refração através de combinações de FBGs ou LPFBGs com interferômetro Mach-Zehnder, interferômetro Fabry-Perot ou interferômetro de Michelson (MI) (CHEN et al., 2005; LEE; SAINI; JEONG, 2010; GOUVEIA et al., 2011; ENRÍQUEZ; CRUZ; GIRALDI, 2012; ZHANG et al., 2013b; YIN et al., 2014a; YAO et al., 2014; BERRETTONI et al., 2015; XIONG et al., 2016; AHMED et al., 2016; LIU et al., 2016; JIANG et al., 2017; ZHANG et al., 2017; XIANG et al., 2017; XIANG et al., 2018; TIAN et al., 2018; LIU et al., 2018b; XIONG et al., 2016; OLIVEIRA et al., 2016). Embora muitos estudos já tenham explorado essa combinação, a maioria deles se baseia no

mesmo princípio operacional. Nesses estudos, os interferômetros de fibra (MZI, FPI ou MI) são projetados para serem sensíveis tanto às variações externas de índice de refração quanto de temperatura, enquanto as FBGs são predominantemente usadas como seções de detecção de temperatura. A forma como essas estruturas são utilizadas para a detecção de temperatura e índice de refração já foi abordada anteriormente. No entanto, existem algumas abordagens que se destacam por apresentarem uma metodologia diferenciada.

Liu e colaboradores (2016) desenvolveram um sistema de sensor que utiliza uma fibra de grade de Bragg fortemente curvada. Nesse sistema, a curvatura forte acopla a luz no revestimento, o que afeta o modo de propagação no núcleo, proporcionando sensibilidade ao índice de refração. A grade de Bragg é utilizada especificamente para medir a temperatura (LIU et al., 2016). Em 2014, Yin e colaboradores demonstraram um sistema sensor que combina uma fibra de cristal fotônico preenchida com líquido, formando um interferômetro Mach-Zehnder, com uma grade de fibra de longo período escrita em uma fibra monomodo (YIN et al., 2014a). A mudança no comprimento de onda ressonante do LPFG responde tanto ao índice de refração quanto à temperatura, enquanto o líquido utilizado é sensível apenas à variação de temperatura (YIN et al., 2014a).

A medição simultânea de temperatura e índice de refração por meio de sensores multiparâmetros também pode ser realizada usando o princípio de modulação de intensidade da luz, combinado com outras técnicas, como interferometria e espalhamento de luz em fibras ópticas (CHOI et al., 2010; WONG et al., 2010a; YANG; WANG; LIAO, 2011; WANG; WANG, 2012; ZHANG et al., 2013a, 2013a; RAN et al., 2013; XUE et al., 2013; TAN et al., 2014; LI et al., 2014; ZHAO; CAI; LI, 2015; SHI et al., 2015; WANG et al., 2018). Sensores mais complexos para medição simultânea de três parâmetros (pressão, temperatura e RI) baseado no mesmo princípio também foram relatados (PECHSTEDT, 2014; BREMER et al., 2017). Nesses sistemas, a refletividade total ou de uma superfície específica do sensor pode ser medida para determinar o índice de refração da amostra, enquanto outros mecanismos são empregados para a detecção de temperatura. Os sensores multiparâmetros baseados em modulação de intensidades abrem possibilidade para uma classe de sensores bastante interessantes, a de sensores multiplexados. Esses sensores destacam-se pela capacidade de medir várias grandezas físicas em diferentes pontos utilizando apenas um único link de fibra óptica, o que os torna atraentes para aplicações em que é necessário medir múltiplas variáveis em um sistema complexo e/ou hostil. Além disso, a combinação de várias técnicas de medição em um único sensor permite uma alta performance de detecção. Esses sensores têm a capacidade de monitorar vários parâmetros ao longo de múltiplos pontos ou de maneira distribuída, realizando medições precisas e confiáveis. Tal característica torna esses sensores muito atrativos para aplicações em diferentes áreas, como engenharia civil, biomedicina e processos industriais.

Hong Xue e colaboradores (2013) apresentaram um modelo de sensor multiparamétrico que utiliza uma estrutura de fibra monomodo-multimodo para medir simultaneamente o índice

de refração e a temperatura em soluções (XUE et al., 2013). Esse sistema modula o comprimento de onda do mínimo de interferência devido às variações de temperatura da solução, enquanto a intensidade refletida varia de acordo com o índice de refração da solução, devido à reflexão de Fresnel na interface entre a fibra multimodo e a solução (XUE et al., 2013). O sensor multiparamétrico usa uma estrutura de fibra monomodo e multimodo para medir índice de refração e temperatura em soluções. A interferência entre diferentes modos na fibra multimodo é analisada por um analisador de espectro óptico (OSA), fornecendo informações sobre o índice de refração da solução. Além disso, o deslocamento do comprimento de onda mínimo de interferência em relação à temperatura permite medir a temperatura diretamente, eliminando a sensibilidade cruzada (XUE et al., 2013).

Um caso particular de um sensor de modulação de intensidade para detecção simultânea de índice de refração e temperatura baseado em FBG foi proposto e demonstrado por Allan Wong e colaboradores (WONG et al., 2010a). O sensor usa uma estrutura de FBG para detecção simultânea de índice de refração e temperatura. Eles empregam um laser de fibra refletora de Bragg distribuído, que inclui uma terceira grade inclinada como atenuador de cavidade variável. Modificando o índice de refração próximo à fibra, a potência de saída varia de acordo com o índice de refração circundante, permitindo a medição do índice de refração. Além disso, o comprimento de onda do laser varia com a temperatura, possibilitando a medição da temperatura. O sensor possui sensibilidade de -3.94 dB por 0.1 unidade de índice de refração e 10.34 pm/°C para índice de refração e temperatura, respectivamente (WONG et al., 2010a).

O sensor proposto por Choi e colaboradores para detecção simultânea de índice de refração e temperatura baseia-se na medição da taxa de reflexão das superfícies de dois sensores adjacentes (CHOI et al., 2010). Esse sistema utiliza a fusão de uma fibra multimodo (MMF) com uma fibra monomodo (SMF), com um pequeno espaço de ar entre elas, criando cavidades independentes de Fabry-Perot. A cavidade de ar é afetada apenas pela temperatura, enquanto a cavidade da MMF é influenciada pela temperatura e pelo índice de refração em sua face final. Isso permite separar as medidas dos dois efeitos sem interferência mútua. A variação da intensidade do espectro de frequência é causada apenas pelo índice de refração, possibilitando a sua determinação, enquanto o deslocamento do espectro de frequência é causado apenas pela variação da temperatura, sem ser afetado pelo índice de refração da amostra. Isso elimina a sensibilidade cruzada e permite medidas independentes (CHOI et al., 2010).

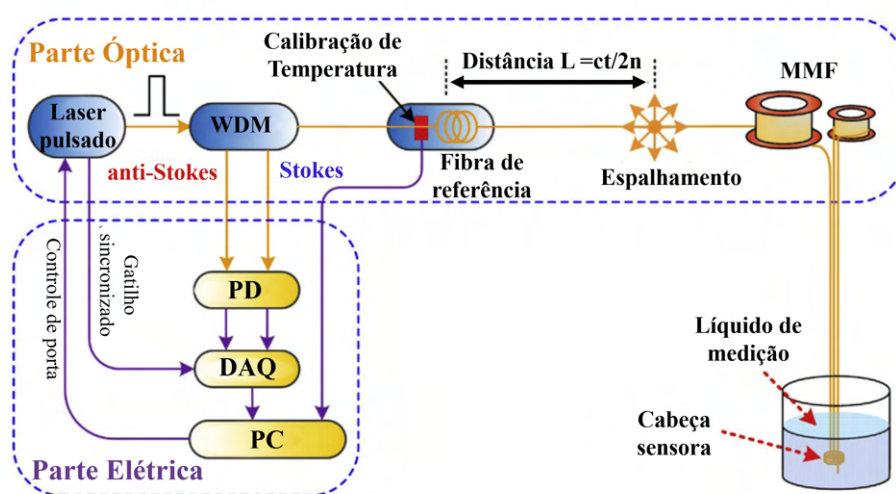
A utilização da modulação de intensidade em uma combinação de diferentes sensores pode resultar em sistemas altamente interessantes com um amplo potencial de aplicação em diversos setores. Um exemplo notável é o sensor relatado por Dong Wang e colaboradores (2018) (WANG et al., 2018).

Wang e colaboradores propuseram e demonstraram experimentalmente um sistema sensor distribuído inovador que possibilita a medição simultânea de temperatura e índice de refração de líquidos. O sistema apresentado, adiciona uma cabeça sensora para medição de índice de

refração a um sistema distribuído de detecção de temperatura baseado em espelhamento Raman em fibras ópticas multimodo. A cabeça sensora de IR é constituída por um prolongamento de fibra óptica multimodo perpendicularmente clivado para formar um espelho refletor. Como o IR líquido pode ser influenciado pela temperatura, uma bobina de fibra óptica foi projetada para compor uma unidade de medição de temperatura do líquido (WANG et al., 2018).

A configuração experimental utilizada para avaliar o sensor é mostrada na Figura 23, sendo dividida em duas partes: óptica e elétrica. A parte óptica inclui um laser pulsado operando em 1550 nm, um multiplexador por divisão de comprimento de onda (WDM) e a fibra sensora, todos implementados utilizando fibras ópticas multimodo padrão. A parte elétrica é composta por um fotodetector (PD) de dois canais, uma placa de aquisição de dados (DAQ) e um computador (PC). A luz pulsada é enviada para o link sensor, onde são gerados os sinais Stokes e anti-Stokes ao longo de toda a fibra, incluindo a face final da fibra. Os sinais ópticos de retorno, incluindo a luz refletida na unidade de índice de refração, são detectados, convertidos para sinais elétricos e processados para obtenção da medida distribuída de temperatura e índice de refração do líquido.

Figura 23 – Sensor óptico de índice de refração de líquidos baseado em reflexão de Fresnel da luz anti-Stokes (WANG et al., 2018).



Fonte: Adaptado de Wang et al., (2019).

No sistema sensor proposto por Wang e colaboradores (WANG et al., 2018), a temperatura é demodulada pela razão de intensidades da luz retroespalhada Raman anti-Stokes e Stokes, enquanto o índice de refração (IR) é demodulado com base na reflexão de Fresnel da luz Raman anti-Stokes na interface fibra-líquido. Dessa forma, é possível medir simultaneamente e de forma independente o índice de refração do líquido e a temperatura ao longo de todo o link sensor. O sensor foi avaliado em um link de fibra óptica de até 10 km e apresentou uma resolução de índice de refração de até 0,0002 unidades de índice de refração (UIR) e uma precisão de temperatura de ± 11 °C. Este trabalho é notável por ampliar as capacidades dos sistemas de

detecção de temperatura baseados em Raman, que já são uma tecnologia consolidada e estão atualmente disponíveis no mercado.

Com a adição da capacidade de medir o índice de refração do líquido, o sistema proposto por Wang et al. pode oferecer um conjunto mais completo de informações sobre o meio sob análise com todas as vantagens que os sistemas de fibra ópticas oferecem. De modo que o sistema sensor é capaz de medir de forma simultânea e independente o índice de refração do líquido e a temperatura em todo o comprimento da fibra óptica, o que representa uma importante contribuição para a área de sensores distribuídos. Além disso, esses sistemas podem fornecer um conjunto mais completo de informações sobre o meio em análise, aproveitando todas as vantagens dos sistemas de fibra óptica.

4 SENSOR DISTRIBUÍDO DE TEMPERATURA BASEADO EM ESPALHAMENTO RAMAN DE AMPLA FAIXA DE OPERAÇÃO DE TEMPERATURA (-196 ATÉ +400 °C)

Neste capítulo são abordados os resultados experimentais do sistema sensor, baseado em espalhamento Raman espontâneo em fibras ópticas monomodo, para o monitoramento distribuído de temperatura. O sistema sensor é avaliado em uma ampla faixa de temperatura, de -196°C a +400°C, e aos resultados fornecem valores para a sensibilidade, precisão e resolução do sensor para toda sua faixa de temperatura de operação. Além disso, são apresentados os resultados experimentais da avaliação de um tipo especial de fibra óptica como elemento sensor, para operação em ambientes de altas temperaturas, e análises das fibras após a exposição a temperatura extremas. A Seção 4.1 apresenta a configuração experimental sistema de detecção, baseado em Espalhamento Raman, implementada para monitorar a temperatura de forma distribuída ao longo de vários quilômetros de fibra óptica. Na Seção 4.2, são apresentados e discutidos os resultados experimentais alcançados com o sensor de temperatura. Por fim, na Seção 4.3 são apresentadas as conclusões deste capítulo.

4.1 SENSOR DISTRIBUÍDO DE TEMPERATURA BASEADO EM ESPALHAMENTO RAMAN

Nesta Seção, é detalhada a configuração experimental utilizada no desenvolvimento do sensor de temperatura distribuído, baseado em espalhamento Raman, utilizando um equipamento OTDR comercial, e amplificação à fibra dopada com Érbio (EDFA) padrão.

4.1.1 Configuração Experimental

A configuração experimental usada para implementar o sensor de temperatura distribuído baseado em Espalhamento Raman, usando OTDR comercial e EDFA padrão é mostrado na Figura 24 -(a). Ainda no sistema da Figura 24, o OTDR, operando à 1550 nm, emite pulsos de luz de largura pré-definida. Esses pulsos são amplificados por EDFA, e injetados no link sensor através de um circulador óptico. O OTDR utilizado é um equipamento da Anritsu (Modelo MT9083C2), com potência óptica máxima de 0,15 W e faixa dinâmica de 25 dB @ 100 ns e 45dB @ 20 μ s. As especificações do equipamento OTDR empregado são descritas na Tabela 2. Os pulsos-OTDR amplificados, ao se propagarem pela fibra óptica sensora, promovem a

ocorrência do espalhamento Raman espontâneo. Um carretel de fibra óptica monomodo padrão, com 1,45 km de comprimento, é inserido no início do sistema para evitar a região de zona morta do OTDR no enlace de detecção. Dois circuladores ópticos de três portas, com perda de inserção máxima de 1,0 dB e isolamento > 40 dB @ 1550 nm, enviando os pulsos-OTDR amplificados para a fibra óptica sob teste, e direcionam os sinais retroespalhados de volta para o OTDR. Além disso, o circuladores bloqueiam os sinais refletidos entre eles, evitando, assim, a distorção da medida e danos ao laser de bombeio, devido a esses sinais refletidos. Os sinais retroespalhados são filtrados por um filtro óptico passa-banda, que é usado para separar as bandas anti-Stokes (1400-1480 nm) e Stokes (1610-1700 nm), e para evitar as interferências da emissão espontânea amplificada (ASE - amplified spontaneous emission) no sinal detectado. Por fim, as curvas-OTDR dos sinais detectados são armazenadas para processamento.

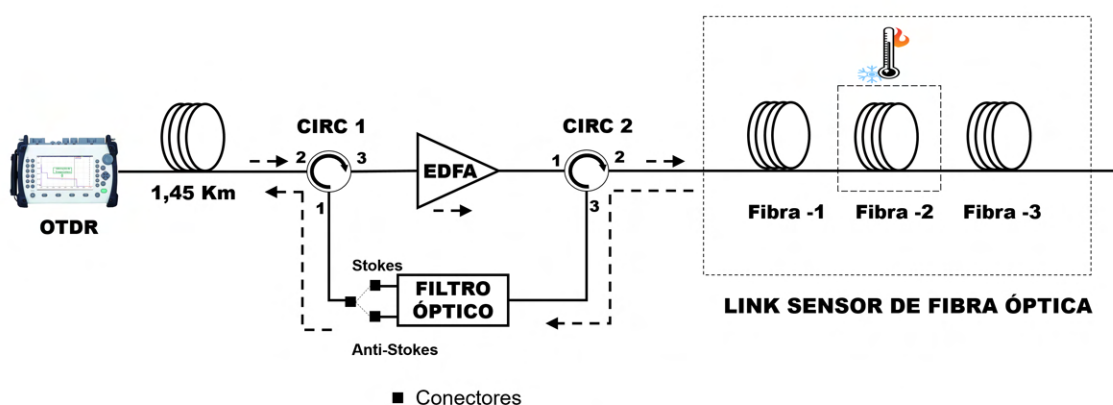
Tabela 2 – Especificações do OTDR MT9083C2 ACCESS Master. Fonte: Manual de operação do MT9083 Series ACCESS Master, 2016

Parâmetro	Especificações
Faixa dinâmica	(1,32 / 1,55 μm): 45/45 dB @ 20 ns, 25/25 dB @ 100 ns
Zona morte (luz retroespalhada)	1.31 μs $\leq$ 6,0 m, 1,55 μs $<$ 6.5 m
Zona morte (reflexão de fresnel)	≤ 1.0 m
Comprimento de onda	1310/1550 $\pm$ 25 nm
Largura de pulso	3/10/20/50/100/500 ns, 1/2/4/10/20 ns
Potência óptica máxima de saída	0.15 W
Precisão na medida de perda	≤ 2 dB
Faixa de distância	0.5/1/2.5/5/10/25/50/100/200/300 km
Resolução espacial	0,31 @ 3 ns, 1,02 @ 10 n, 10,2 @ 100 ns

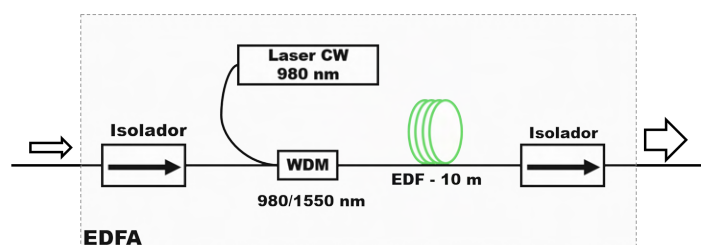
Fonte: Manual de operação do MT9083 Series ACCESS Master, 2016.

Um amplificador EDFA foi implementado conforme esquematizado na Figura 24 -(b). No sistema da Figura 24 -(b), um dispositivo WDM 980/1550 nm foi utilizado para unificar o sinal do laser de bombeio em 980 nm e o sinal OTDR em 1550 nm, e acoplar esses sinais em uma fibra dopada com érbio (*EDF - Erbium Doped Fiber*). A EDF utilizada é do tipo M-3(1480/125), e tem 10 m de comprimento. Na construção do EDFA, optou-se por utilizar um laser de bombeio CW, operando à 980 nm, para evitar interferência na faixa espectral dos sinais retroespalhados Raman anti-Stokes e Stokes. Também foram utilizados dois isoladores ópticos, com perda de inserção máxima de 1 dB, para evitar possíveis sinais de retorno propagando-se no sentido à fonte de luz. Além disso, 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 podem ocasionar a saturação do detector. Por fim, o EDFA foi configurado para produzir 18 dBm de potência de saída. O link sensor de fibra óptica é composto por três carretéis (Fibra-1, Fibra-2 e Fibra-3) de fibra monomodo padrão, com coeficiente de atenuação em 1550 nm de 0,19 dB/km. Durante os experimentos, os carretéis Fibra-1 e Fibra-3 têm seus comprimentos variados, e são mantidos a temperatura ambiente. O carretel Fibra-2 também tem seu comprimento variado, e é

Figura 24 – (a) Configuração experimental usada para implementar o SDT-R, usando OTDR comercial e EDFA; (b) Configuração do EDFA implementado.



(a)



(b)

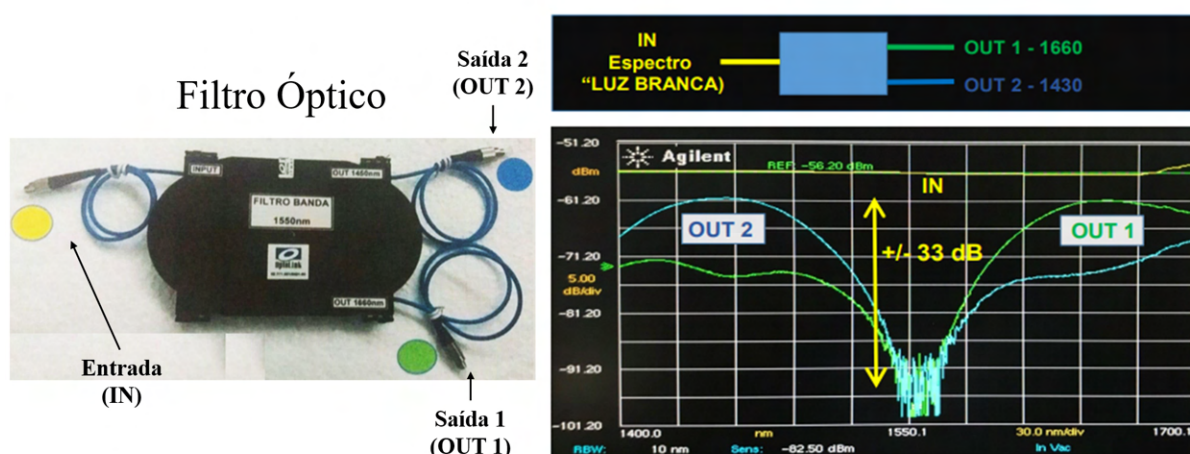
Fonte: o autor, 2023.

inserido em ambiente de temperaturas controladas. O comprimento total do enlace óptico varia de 7 até 27 km. Essas variações são realizadas com o objetivo de testar e avaliar o desempenho do sensor em diferentes comprimentos e em diferentes pontos do link.

O filtro óptico utilizado foi customizado 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 (1650 nm) e anti-Stokes (1450 nm). A Optolink é uma empresa brasileira, localizada na cidade de Campinas - SP, especializada em tecnologia de comunicação óptica. A Figura 25 mostra o filtro óptico utilizado e a caracterização do espectro de saída nas portas de 1660 nm (OUT 1) e de 1430 nm (OUT 2), quando uma fonte de luz de banda larga é acoplada a porta de entrada ("luz branca - in"). O filtro óptico de passa-faixa de banda larga é utilizado para isolar e transmitir uma faixa de banda larga do sinal de interesse, e refletir os outros comprimentos de onda incidente, que podem comprometer e inviabilizar a obtenção dos resultados finais, como é o caso da ASE. Devido a potência óptica tipicamente baixa do sinal Raman anti-Stokes, a isolamento promovida pelo filtro é um fator de grande importância para operação do sistema sensor. À vista disso, o filtro utilizado promove uma atenuação de aproximadamente 33 dB na faixa de 1520-1580 nm, e cerca de 3,5 dB em 1450 nm e 1660 nm,

como pode ser observado na Figura 25. O filtro óptico foi acoplado ao sistema por meio de conectores de fibra óptica do tipo FC (*ferrule connector* - conector de ponteira) equipado com uma conexão roscada (FC/PC-SM).

Figura 25 – Filtro óptico passa-banda customizado com duas portas de saída referentes as bandas anti-Stokes (OUT 1 - 1450 nm) e Stokes (OUT 2 - 1660 nm), e espectro de saída do filtro.



Fonte: o autor, 2023.

A maioria dos sistemas SDT-R baseados em Espalhamento Raman espontâneo em fibras monomodo, operando em aproximadamente 1550 nm, monitora as variações da razão entre intensidades do sinal anti-stokes dependente da temperatura e do sinal Stokes (BOLOGNINI; HARTOG, 2013). Nesse sistema, o monitoramento da temperatura é baseado apenas nas alterações de intensidade do sinal anti-Stokes, e traços de referências para temperaturas conhecidas são utilizadas para normalizar o anti-Stokes. Essa normalização corrige a atenuação do sinal ao longo da distância de propagação na fibra e minimiza efeitos degradantes ao sinal que podem comprometer a medida de temperatura. Além disso, esse método elimina a inserção de ruído resultante do chaveamento óptico manual das porta de saída do filtro óptico. O chaveamento óptico manual das portas de saída do filtro introduz ruídos significativos no sinal detectado, com uma perda de mais de 3 dB, o que torna inviável a obtenção de informações. Essa interferência é principalmente atribuída à contaminação dos conectores ao longo desse processo, que é repetido várias vezes em um curto espaço de tempo. No entanto, esses efeitos podem ser reduzidos significativamente por meio do chaveamento óptico automático. O método empregado para a normalização envolve o cálculo da razão entre as intensidades anti-Stokes, medidas em diferentes temperaturas, e a curva de intensidade do mesmo sinal obtida a uma temperatura de referência. Essa normalização é aplicada a todos os pontos ao longo do enlace do sensor. Na realização da normalização das curvas experimentais, a temperatura de referência escolhida foi a temperatura

ambiente (25°C). Adicionalmente, uma parte do próprio enlace do sensor foi utilizada como referência interna em cada traço, por meio de um método de correção referenciada.

O procedimento fundamental para determinar a distribuição de temperatura consiste na realização uma calibração do sensor com base na intensidade anti-Stokes medida em várias temperaturas conhecidas. Nesse procedimento, os pontos experimentais foram ajustados, resultando na obtenção da função que estabelece a relação entre a intensidade detectada e o parâmetro de análise.

O desempenho do sensor foi avaliado sob diferentes aspectos, como diferentes regiões de detecção, largura do pulso-OTDR, e faixa de temperatura de operação. No que se refere a faixa de temperatura de operação, os experimentos aconteceram em dois estágios: aquecimento e resfriamento. Na fase de aquecimento, o carretel de fibra óptica na posição de Fibra-2 é inserido num forno de temperatura de aquecimento controlada e isolamento térmico. O forno utilizado é um forno de mufla de microprocessador digital (SPLabor - SP – 1200 DM / G), com faixa de temperatura de 50 a 1200 ° C. Nessa situação, fibras ópticas são aquecidas para temperaturas de até 400 °C. No resfriamento, a Fibra-2 é submetida a baixas temperaturas, atingindo temperaturas criogênicas por imersão em nitrogênio líquido a -196,15 °C. Não foram encontrados na literatura trabalhos que demonstrassem o funcionamento de sensores distribuídos de temperatura baseados em espalhamento Raman nessa faixa de operação. A Tabela 3 apresenta as informações sobre faixa de temperatura de operação em alguns esquemas SDT-R relatados na literatura. O sensor também foi avaliado para larguras de pulso-OTDR entre 100 ns e 4000 ns. O impacto da largura do pulso na sensibilidade e no alcance desse sensor de temperatura foi relatado em M. S. Silva, et al. (2018).

Tabela 3 – Temperatura de operação e largura temporal do pulso-OTDR em sistemas SDT-R apresentados por diversos autores.

Referência	Temperatura de Operação	Largura de Pulso (ns)
F. R. Bassan, et al., (2016)	21 °C – 86°C	100
G. Bolognini, et al., (2007)	26 °C – 77 °C	100
F. R. Bassan, et al., (2015)	25 °C – 80 °C	100
M. A. Soto, et al., (2011)	25 °C – 55 °C	10
D. Hwang, et al., (2010)	23 °C – 100 °C	50
A. Signorini, et al., (2010)	10 °C – 50 °C	10
J. Park, et al., (2006)	26 °C – 77 °C	100
J. P. Dakin et al., (1985)	-183°C - 68 °C	15
A. Hartog et al., (1985)	-51 °C – 120 °C	40
C. Xin e M. Guan, (2019)	-196°C - -106 °C	100
F. Baronti, et al., (2010)	26°C – 50 °C	100
M. Peixoto e Silva, et al., (2018)	32°C – 100 °C	100 - 4000

Fonte: o autor, 2023

4.2 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A medida de temperatura é obtida a partir dos traços OTDR do link de fibra sensora, usando o OTDR em combinação com o EDFA para estimular a ocorrência do espalhamento Raman, com a região de análise (Fibra -2) sob aquecimento ou resfriamento. O equipamento OTDR fornece as curvas de intensidade dos sinais anti-Stokes retroespalhados em função da distância em todo o link sensor, para as diferentes temperaturas as quais a Fibra-2 está sujeita.

Para obter as curvas de intensidade referente ao sinal Stokes, é necessário conectar ao OTDR na porta de saída Stokes do filtro óptico. As curvas de intensidade são obtidas em 7,5 minutos, que corresponde ao tempo para realizar médias, e minimizar, dessa forma, a influência de flutuações na medida de temperatura. Além disso, essas curvas são obtidas configurando o OTDR para emitir pulsos com duração pré-definida por uma distância de até 50 km, com densidade de 25001 pontos.

Na situação de aquecimentos, os sinais anti-Stokes restroespalhados são obtidos em duas condições distintas. Inicialmente, todo o link sensor é mantido a temperatura ambiente. Posteriormente, o carretel de Fibra-2 é levado ao forno mufla, onde é mantido sob aquecimento controlado para diferentes valores de temperatura, conforme mostrado na Figura 24-(a). A temperatura de aquecimento é acompanhada através de um termômetro, localizado no interior da câmara de aquecimento do forno. A precisão e a resolução do termômetro usados na faixa de temperatura entre -50 °C e 70 °C são de $\pm 0,1$ °C e 0,1 °C, respectivamente, e nas demais faixas de temperatura o grau de precisão é < 1 °C. Os traços OTDR são obtidos durante o resfriamento natural da Fibra-2, dentro do forno, e sob isolamento. Esse método leva em consideração a baixa taxa de resfriamento do sistema, devido ao isolamento térmico proporcionado pela estrutura do forno, e tem como objetivo manter a Fibra-2 sob temperatura aproximadamente constante durante as medições. Além disso, esse método fornece o tempo necessário para estabilizar a amplitude do sinal a determinada temperatura. Esse protocolo foi repetido em todos os experimentos de aquecimento.

A Figura 26 mostra as curvas de intensidade dos sinais anti-Stokes e Stokes, obtidas usando a configuração da Figura 24, para o carretel de Fibra-2 com 600 m de fibra SMF-28 aquecidos até 100 °C, e pulsos OTDR de 100 ns. Nessa situação, os comprimentos dos carretéis de Fibra-1 e Fibra -2 são, respectivamente, 1,9 km e 24,5 km. Ainda na Figura 26-(a), são observados os picos de intensidade do sinal anti-Stokes decorrentes das alterações de temperatura, na porção aquecida do enlace (Fibra-2). Nas demais regiões, mantidas a temperatura ambiente, o nível do sinal é mantido constante. Portanto, o sensor se mostrou capaz de identificar precisamente a região do enlace aquecida. Além disso, o sinal anti-Stokes detectado traduz adequadamente o aumento da temperatura na região sob análise, sendo possível verificar a mudança do nível anti-Stokes para uma alteração de 5°C na temperatura. Por outro lado, não são observados picos de intensidade do sinal Stokes, no qual o nível de intensidade é mantido

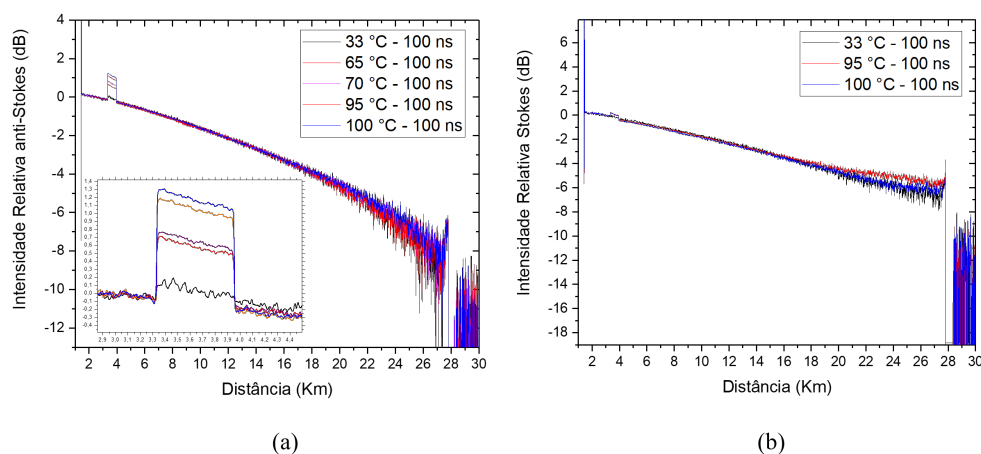
aproximadamente constante, como pode ser visto na Figura 26-(b). Esses resultados mostram que os sinais detectados pelo OTDR correspondem as bandas Stokes e anti-Stokes, geradas no Espalhamento Raman na fibra de teste. As curvas da Figura 26 exibem o perfil característico das componentes do espalhamento Raman, sendo o anti-Stokes fortemente sensível a temperatura, enquanto a sensibilidade do Stokes, as variações de temperatura, é muito pequena (SINGH; SINGH, 2007).

As diminuições das intensidades com a distância, observadas na Figura 26, são decorrentes das perdas de propagação dos sinais na fibra óptica, que são diferentes para os sinais anti-Stokes e Stokes. Essas perdas comumente limitam o alcance do SDT-R, que pode ser melhorado aumentando a potência do sinal de entrada (BOLOGNINI; HARTOG, 2013).

Com o objetivo de avaliar possíveis distorções na forma de onda resultantes de efeitos transitórios decorrentes da amplificação através de uma fibra dopada com Érbio (Amplificador de Fibra Dopada com Érbio - EDFA) e de examinar qualquer impacto desses efeitos, foram conduzidos testes experimentais. Para isso, a forma de onda do sinal de saída do filtro óptico foi examinada utilizando um osciloscópio, enquanto o OTDR operava a uma taxa de repetição de 2,8 kHz, com emissão a 1550 nm. A saída do filtro foi conectada ao osciloscópio por meio de um fotodetector, utilizado para detectar a faixa do sinal de saída. Durante esse processo, não foram observadas quaisquer deformações na forma da onda.

O perfil de temperatura desse sistema é obtido a partir do traço OTDR dos sinais anti-Stokes retroespalhados, curvas de referência para temperaturas conhecidas, e etapas de processamento de dados. Na etapa de processamento de dados, são feitas as correções de efeitos degradantes do sinal, empregando técnicas de normalização, e por fim, é efetuado o cálculo da temperatura em toda a extensão do link sensor.

Figura 26 – Curvas OTDR de intensidades do sinal retroespalhado Raman anti-Stokes (a) e Stokes (b) para 600 m de fibra óptica aquecidas até 100 °C .



Fonte: o autor, 2023.

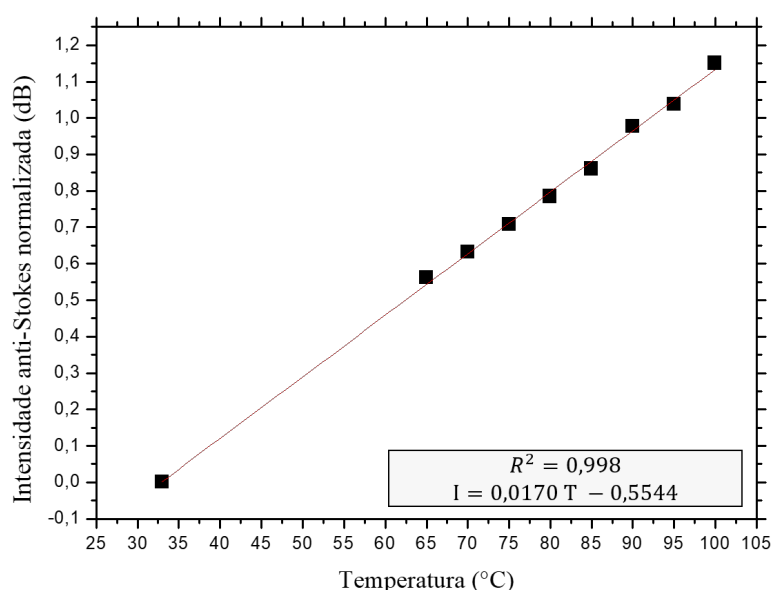
Para caracterizar o sensor, foram realizados testes experimentais submetendo a Fibra-2 a aquecimento, na faixa de temperatura em 30 e 100 °C, usando pulsos de 100 ns e 4000 ns. Os experimentos foram realizados em duas etapas, que combinam a região de aquecimento e largura de pulso, em um link sensor com 27,8 km de fibra óptica monomodo padrão. Inicialmente, o experimento foi realizado para o carretel de Fibra-2, onde foi alocado na posição 3,4 km link sensor, usando pulsos de 100 ns. Posteriormente, o carretel de Fibra-2 foi posicionado na porção final do link sensor, na posição de 25,4 km, utilizando pulsos-OTDR de 4000 ns. A região de aquecimento foi estabelecida com o objetivo de avaliar o alcance do sensor, levando em consideração resultado anteriores, onde mostram o impacto da largura do pulso na sensibilidade e no alcance do sensor (SILVA et al., 2018b).

A Figura 28 mostra os picos de intensidade anti-stokes, obtidos via OTDR, e as distribuições de temperatura na região de aquecimento obtidos a partir do aquecimento de 620 m de fibra óptica, usando pulsos-OTDR de 100 ns e 4000 ns. Observa-se, nas Figuras 28-(a) e (c), que em ambos os casos é possível detectar as regiões de aquecimento no link sensor, e distinguir variações de temperatura de 5 ° C. Uma análise mais acurada mostra que a sensibilidade do sensor usando pulsos de 100 ns é $0,0170 \pm 2 \times 10^{-4}$ dB/°C, maior em relação ao sistema usando pulsos de 4000 ns, que é de $0,0081 \pm 5 \times 10^{-4}$ dB/°C. O parâmetro de sensibilidade do sensor foi determinado considerando variação de intensidade do sinal detectado na faixa de temperatura avaliada. Esse parâmetro representa a taxa de variação da intensidade com a temperatura, obtida ao ajustar os pontos experimentais por meio de uma função no processamento dos dados. Por outro lado, o alcance do sensor, quando pulsos-OTDR de 100 ns são utilizados, é limitado a aproximadamente 15 km, Para distâncias maiores, as curvas são muito ruidosas e pouco práticas para a identificação de pequenas variações de temperatura. Nesse caso, a intensidade relativa do ruído é superior à 1 dB, e a resolução de temperatura, em postos com mais de 15 km de distância, é elevada para mais de 20 °C. Resultando na inviabilidade de medição na posição de 25,5 km, onde as alterações de temperatura não puderam ser detectada. O alcance do sensor pôde ser ampliado usando pulsos de 4000 ns, sendo possível, assim, detectar as alterações de temperatura na região final do link sensor, após uma distância de 25 km da fonte. A utilização de pulsos-OTDR de 4000 ns para monitorar variações de temperatura no região inicial resultou em uma pequena diminuição da sensibilidade do sensor, sendo de $0,0157 \pm 6 \times 10^{-4}$ dB/°C. No entanto, a resolução espacial do OTDR, nessa situação, é substancialmente afetada.

A resolução espacial do OTDR depende da largura do pulso emitido, de modo que pulsos mais curtos resultam em melhor resolução espacial. Em consequência disso, as formas dos sinais anti-stokes nas Figuras 28-(a) e (c) são diferentes. As distribuições de temperatura, exibidas nas Figuras 28-(b) e (d), foram alcançadas após etapas de processamento de dados, nas quais foram utilizados curvas de referências a temperatura ambiente e para temperaturas conhecidas. Nessas etapas, as perdas de propagação foram corrigidas, e uma expressão que permite determinar o distribuição espacial de temperatura, ao longo de todo o link sensor, a partir dos dados experimentais, foi obtida. A Figura 27 apresenta o ajuste dos dados experimentais

por uma curva e equação que relaciona a intensidade anti-Stokes em função da temperatura para pulsos OTDR de 100 ns. Esses resultados experimentais mostram que o sensor é capaz de fazer medições de forma adequada na faixa de temperatura de 28 até 100 °C, com uma resolução temperatura de 5 °C, atingindo o erro máximo de 1,79 °C @ 100 ns para a temperatura de 70°C e de 2,18 °C @ 4000 ns para a temperatura de 100 °C.

Figura 27 – calibração de temperatura criada a partir da intensidade das curvas anti-Stokes normalizadas para pulsos-OTDR de 100 ns.

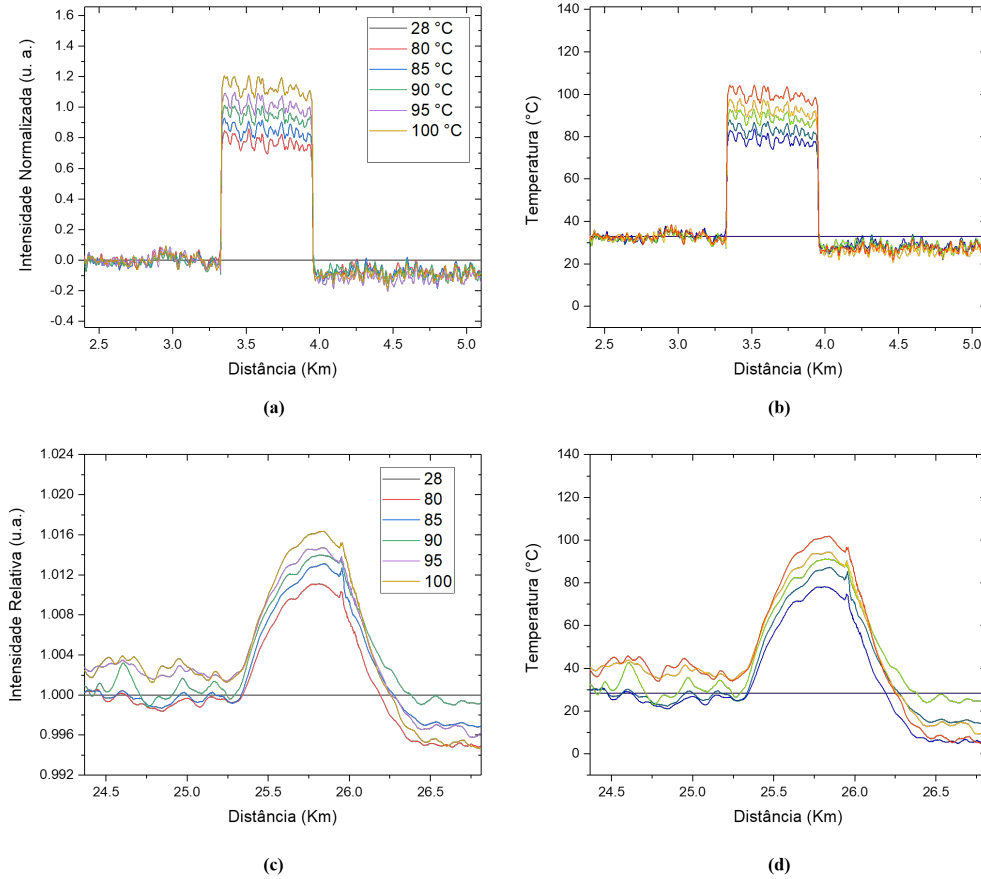


Fonte: o autor, 2023.

Ainda na situação de aquecimento, para avaliar o desempenho do sensor em diferentes faixas de temperatura (até 400 °C), esse protocolo de medição foi repetido algumas vezes, usando o carretel de Fibra-2 com 18 m e 3 m de fibra SMF-28, e pulsos-OTDR de 100 ns. Nesses testes, os carretéis de Fibra - 1 e Fibra - 3 de comprimento 3,387 km e 3,282 km, respectivamente, são mantidos em temperatura ambiente, enquanto o carretel de Fibra-2 é mantido em ambiente de temperatura controlada (forno mufla).

As fibras ópticas padrão para telecomunicações são normalmente especificadas para operação na faixa de temperatura de -60 a 85 ° C, com perdas de propagação de 0,21dB/km@1490nm e 0,19dB/km@1550nm. A mudança na temperatura de operação e o estresse térmico associado podem induzir perdas ópticas dependentes da temperatura (BOLOGNINI; HARTOG, 2013; XINGLING; HUA; YULONG, 2015). Desse modo, a calibração do sensor, em ambiente de temperaturas extremas, pode ser afetada por perdas ópticas adicionais ao sinal de propagação (BOLOGNINI; HARTOG, 2013). Para minimizar os efeitos das perdas de propagação, foram utilizadas curvas de referência em temperaturas

Figura 28 – Picos de intensidades normalizada do sinal retroespalhado Raman anti-Stokes e de temperatura medidos usando pulsos-OTDR de (a-b) 100 ns e (c-d) 4000 ns, para 620 m de fibra óptica aquecidas até 100 °C.



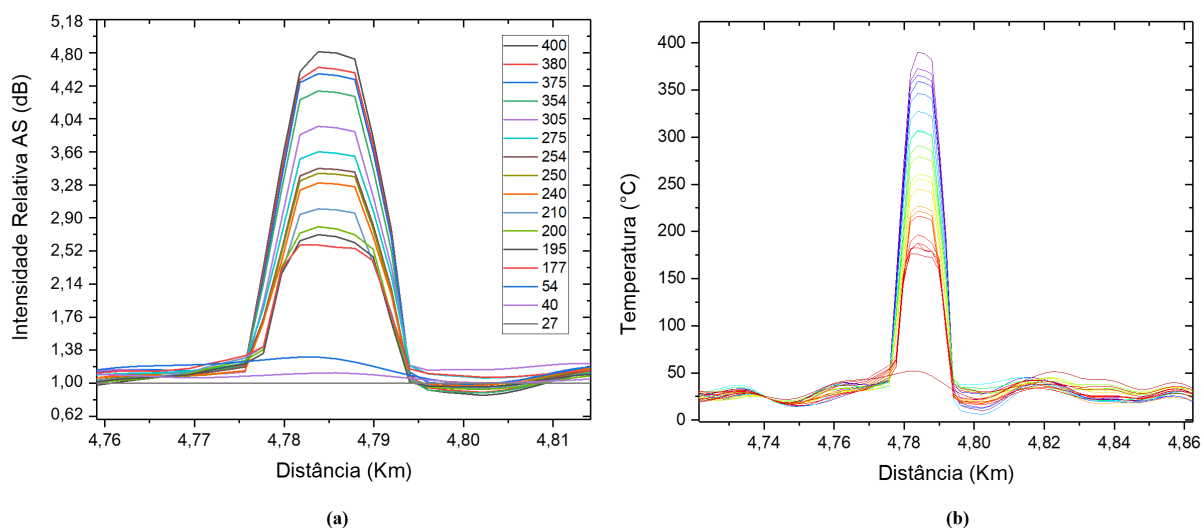
Fonte: o autor, 2023.

conhecidas, e as perdas adicionais foram corrigidas, de forma dinâmica, nas seções mantidas a temperaturas extremas.

A Figura 29-(a) exibe os picos da intensidade relativa do sinal anti-Stokes em função da distância para o carretel Fibra-2 com 18 m de fibra monomodo padrão, aquecido a temperaturas entre 27 e 400 °C. A partir da análise da Figura 29-(a), constata-se que as variações de intensidades decorrentes das alterações de temperatura puderam ser medidas em toda a faixa de aquecimento, sendo possível detectar variações de temperatura de 5 °C. Esse fato pode ser melhor observado analisando as curvas de intensidade na faixa de temperaturas mais altas em 375°C a 380°C, intermediárias em 195°C a 200°C, em 250°C a 254°C, quando um aumento de 4°C na temperatura pode ser detectado. Nesse gradiente de temperatura, a sensibilidade do sensor é de $0,009842 \pm 8 \times 10^{-6} \text{ dB/}^\circ\text{C} @100\text{ns}$. A Figura 29-(b) mostra a distribuição espacial de temperatura do link sensor na região de aquecimento e regiões próximas mantidas a temperatura ambiente. Esses resultados mostram que o sensor é capaz de detectar adequadamente variações

de temperatura no carretel de fibra aquecida (Fibra-2), colocado a uma distância de 4,77 km em um enlace óptico total de 8,5 km, com uma resolução de 5 °C, usando pulsos de 100 ns.

Figura 29 – Curvas OTDR do sinal Raman anti-Stokes retroespalhados (a) e distribuição espacial de temperatura (b) para temperaturas entre 27 e 400 °C.



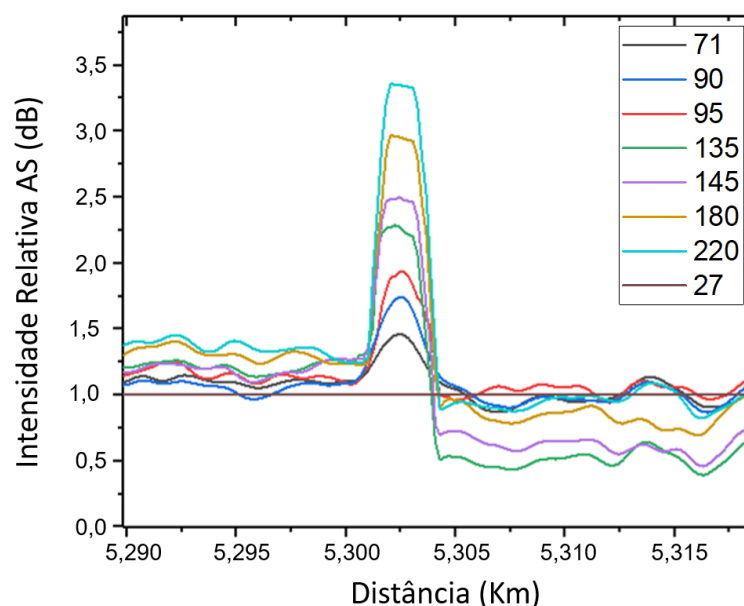
Fonte: o autor, 2023.

Uma importante limitação na operação do sensor na faixa de médias e altas temperaturas, como as da Figura 29, refere-se à resistência do revestimento primário (acrilato) da fibras ópticas SMF-28, utilizados nesses experimentos. Embora as temperaturas da ordem de 400 °C não causem danos ao núcleo e a casca das fibras ópticas convencionais, para temperaturas superiores a 160 °C o acrilato que reveste as fibras ópticas funde, fragilizando a fibra na região sob aquecimento, e tornando-a mais sensível a tensões e, conseqüentemente, a rupturas. Nos experimentos, para comprimento de fibra maiores de 20 m, foram observados vários pontos de quebras na fibra óptica, quando mantida sob temperaturas maiores de 160 °C, impossibilitando as medições de temperatura.

Embora tenha sido possível monitorar uma pequena região de fibra aquecida até 400 °C, para monitoramento de longo prazo em um ambiente de alta temperatura, é necessário o uso de fibras ópticas com revestimentos resistentes ao calor (SOHMA; HATTORI, 2012a). Nesse sentido, o sensor também foi avaliado utilizando uma fibra ótica monomodo comercial com revestimento metálico. Os resultados desses experimentos são mostrados na Figura 30. Neste caso, uma fibra ótica monomodo de 3 m de comprimento, revestida de uma camada de alumínio de 13,0 μm de espessura, é utilizada. A fibra possui ainda uma camada interna adicional de carbono, e opera na faixa de comprimento de onda de 1300 a 1600 nm, com uma atenuação em 1300 nm de aproximadamente 9,5 dB / km. Nos experimentos, essa fibra é inserida na câmara de aquecimento controlado, na posição de Fibra-2 (4,77 km), e submetida a temperaturas de até 300

°C. As especificações do fabricante indicam que a fibra óptica com revestimento de alumínio pode ser submetida a temperaturas de até 400 °C sob um curto período de tempo (< 60 s), e até 300 °C a longo prazo (> 60 s). No entanto, foram observadas várias rupturas ao longo de toda a fibra sob aquecimento, decorrentes tensões nas curvaturas, quando a temperatura atingiu valores acima de 220 °C. A Figura 30 mostra as curvas de intensidade relativa anti-Stokes, como uma função da distância, para temperaturas entre 27°C e 220 °C, obtidas com a fibra metalizada. Sob essas condições, pôde-se constatar que a resolução de temperatura de 5 °C é mantida, e que a sensibilidade do sensor é de $0,011 \pm 0,002 \text{ dB/}^\circ\text{C @100ns}$.

Figura 30 – Curvas OTDR do sinal Raman anti-Stokes retroespalhados obtidas usando 3 m de fibras óptica com revestimento metálico aquecidos de 27 a 220 °C e pulsos-OTDR de 100 ns.



Fonte: o autor, 2023.

Uma análise microestrutural do revestimento da fibra mostrou uma porosidade no revestimento primário devido ao aquecimento, que pode ter fragilizado a fibra óptica, causando sua fragmentação em vários pontos. A Figura 31 mostra as imagens obtidas a partir da análise de diferentes amostras de fibras com revestimento metálico, utilizadas no experimento, aquecidas até 300 °C. A análise foi realizada utilizando um microscópio invertido da marca Nikon, modelo Eclipse TE2000-U, e as imagens foram obtidas usando uma câmera CCD uC480 da Thorlabs. Para observar detalhes específicos das amostras, optou-se por utilizar a técnica de Microscopia de Campo Escuro. Nessa técnica, a iluminação é disposta de modo que a luz diretamente incidente sobre a amostra não é capturada pela lente objetiva, apenas recebe a luz espalhada ou refletida por irregularidades ou partículas (MANNHEIMER, 2002). Através do foco do feixe de luz apenas nas estruturas de interesse, o observador não sofre interferência pelo fundo da amostra,

resultado numa visualização de maior definição, isto é, são captadas as imagens luminosas de fundo escuro (MANNHEIMER, 2002). Desse modo, as discordâncias, que delimitam defeitos, aparecem como linhas claras em fundo escuro (MANNHEIMER, 2002). Esse método é indicado para análise de contornos e falhas (MANNHEIMER, 2002).

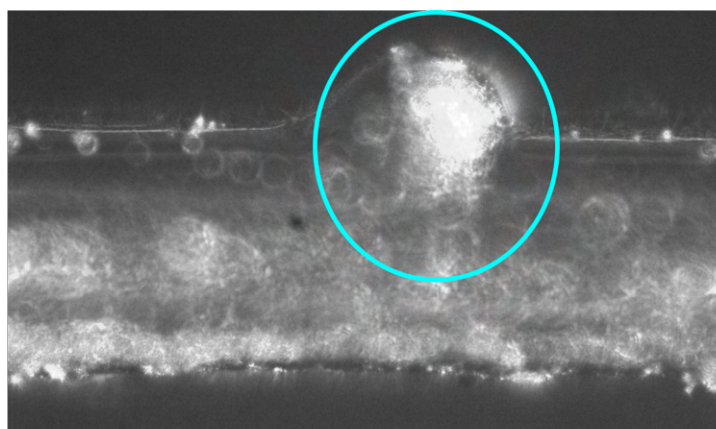
Na Figura 31-(a), observa-se, na parte superior da amostra, uma anomalia, semelhante a uma bolha, que indica uma falha no revestimento causada pela aquecimento da fibra. Nas Figuras 31 -(a-b), notam-se diversos pontos de porosidade ao longo do revestimento metálico da fibra de ambas as amostras examinadas. Essas análises mostraram que, nos testes experimentais, a integridade do revestimento metálico da fibra óptica foi comprometida no aquecimento das amostras, resultando na fragilização da fibra óptica sob aquecimento intenso. Desse modo, a utilização da fibra óptica revestida por uma microcamada de alumínio não possibilitou o aumento da faixa de temperatura de operação do sensor, e avaliação/caracterização do sensor para temperaturas maiores e 400 °C.

Em fibra ópticas com revestimento metálico, a camada externa de metal aumenta a faixa de temperatura de operação e a condutividade térmica da fibra (devido as propriedades térmicas do material). Além disso, o revestimento de material metálico melhora a resistência mecânica da fibra e elimina a emissão de gases. Desse modo, o revestimento de metal evita danos químicos e mecânicos a superfície do vidro, preservando a sílica de elementos hostis que podem causar rupturas na fibra óptica (SOHMA; HATTORI, 2012b). No entanto, os limites de temperatura e tempo de resistência das fibras revestidas de metal depende de diversos fatores, como a composição da atmosfera, estresse mecânico e do ciclo de calor ao qual a fibra é submetida (WYSOCKI, 1983). Além disso, as tensões térmicas podem levar a degradação do revestimento e, conseqüentemente, da fibra óptica (WYSOCKI; BLAIR; VINCE, 1983). Nesse sentido, a espessura e as propriedades do material de revestimento são fatores relevantes para sua conservação em altas temperaturas (WYSOCKI, 1983). Um problema relacionado a resistência de fibras ópticas revestidas de alumínio é que o alumínio, e a maioria das ligas metálicas a base de alumínio, reage com a sílica afetando a resistência da fibra a longo prazo.

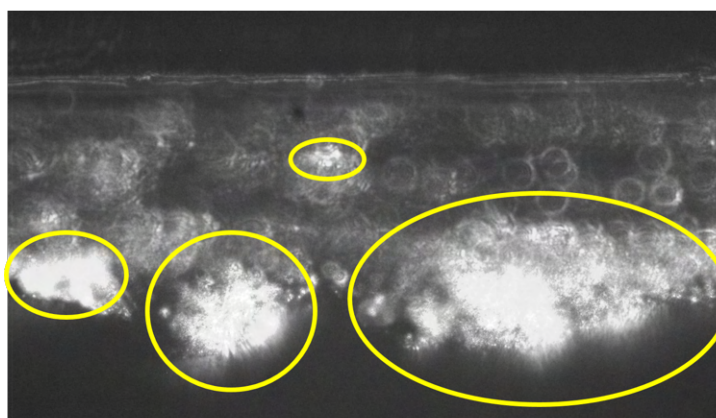
O raio de curvatura das fibras também pode ser um parâmetro importante quanto a resistência da fibra óptica sob aquecimento intenso. No entanto, o raio de curvatura não tem influência sobre a degradação do revestimento, embora possa ter efeito sobre a quebra da fibra. Os raios de curvaturas das fibras utilizadas nos experimentos de aquecimento são limitados pelas câmara de aquecimento (15x15x30 cm). Assim, não é possível realizar experimentos com um raio de curvatura superior a 7 cm. Apesar disso, nos experimentos não foram observadas quebras decorrentes dos raios de curvaturas das fibras.

Nos experimentos de resfriamento, o carretel de Fibra-2 com 150 metros de fibra monomodo padrão foi imerso em um compartimento contendo nitrogênio líquido. Nessa fase, foram obtidas curvas OTDR a temperatura ambiente antes e depois do resfriamento, com objetivo de analisar possíveis penalidades na medida decorrentes de possível degradação da

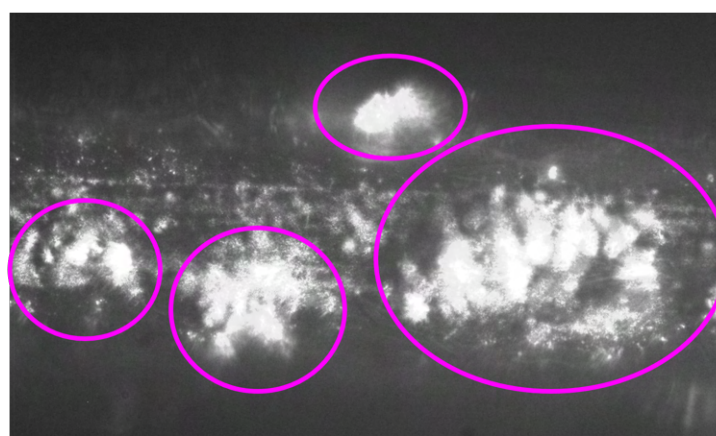
Figura 31 – Imagens de amostras de fibra óptica com revestimento metálico aquecida até 300 °C, obtidas utilizando a técnica de microscopia de campo escuro: (a) amostra 1, (b) amostra 2 e (c) amostra 3.



(a)



(b)



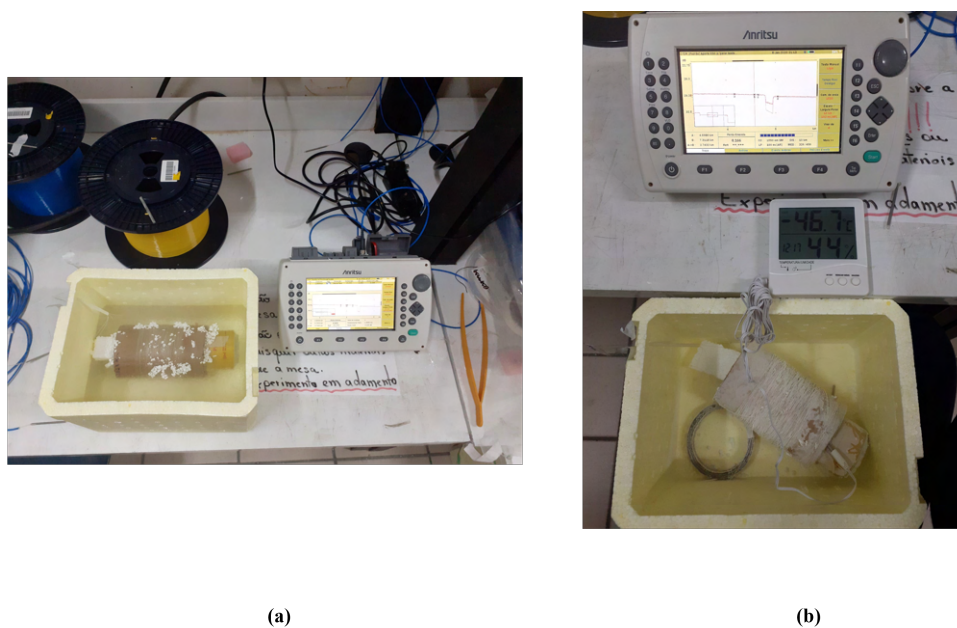
(c)

Fonte: o autor, 2023.

fibra submetida as baixíssimas temperaturas. As curvas OTDR foram adquiridas para o aumento natural da temperatura da fibra, desde a temperatura de liquefação do Nitrogênio (-196 °C) a

temperatura do ambiente , usando pulsos-OTDR de 100 ns. Durante o processo de medição, as temperaturas foram monitoradas por meio de um termômetro em contato com o carretel de Fibra-2. Devido a rapidez com que a temperatura aumenta imediatamente após a evaporação do nitrogênio, o tempo de medida dos traços OTDR foi reduzido para 100s. Esse fator também limita o número de amostras de temperaturas na realização do experimento. A Figura 32 mostra fotografias do arranjo experimental de resfriamento do carretel Fibra-2. Na Figura 32-(a) é possível ver a amostra de fibra óptica (carretel de Fibra-2) submersa em nitrogênio líquido, o aparelho OTDR mostrando os traços de intensidade em função da distância em sua tela, além dos carretéis de Fibra-1 (carretel azul) e Fibra-3 (carretel amarelo). A Figura 32-(b) mostra a obtenção do traço OTDR do sinal anti-Stokes para a temperatura de $-46,7^{\circ}\text{C}$, indicada no display do termômetro.

Figura 32 – Fotografias do processo de resfriamento criogênico do carretel Fibra-2: (a) carretel de Fibra-2 submerso em nitrogênio líquido ($-196,15^{\circ}\text{C}$), OTDR, carretéis Fibra-1 (azul) e Fibra -3 (amarelo); (b) obtenção do traço OTDR do sinal anti-Stokes para a temperatura de $-46,7^{\circ}\text{C}$.

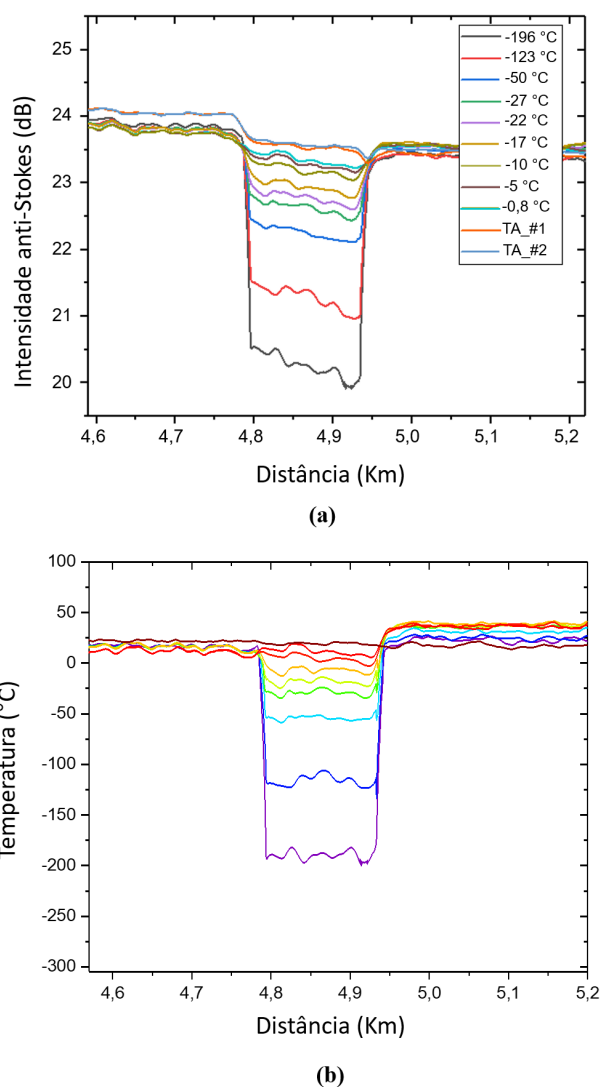


Fonte: o autor, 2023.

A Figura 33-(a) mostra os traços OTDR de intensidade anti-Stokes na região do link sensor sob resfriamento para temperaturas entre $-196,15$ e $-0,08^{\circ}\text{C}$. A Figura 33-(a) também mostra as curvas de intensidade do sinal anti-Stokes para a temperatura do ambiente, obtidas antes e após da resfriamento da fibra, indicadas por $TA_{\#1}$ e $TA_{\#2}$, respectivamente. Nota-se que o nível de intensidade do sinal retroespelhado anti-Stokes detectado mostrou ser invariante para as mesmas condições de medição, não sendo possível identificar alterações imediatas nas propriedades ópticas da fibra após o resfriamento intenso. Além disso, uma análise por meio de microscópio óptico não mostrou danos, ou qualquer alteração visível, à fibra óptica

e ao seu revestimento de acrilato após o experimento de resfriamento. Ainda da Figura 33, é possível verificar que o sensor é capaz de detectar mudanças de 5 °C na temperatura. Para obtenção do perfil de temperatura do link sensor na situação de resfriamento, as curvas de intensidade anti-Stokes obtidas passaram por etapas de processamento de dados, onde as perdas de propagação dependentes da temperaturas no comprimento de onda anti-Stokes foram corrigidas. A distribuição espacial de temperatura na região do resfriamento e regiões próximas é exibida na Figura 33-(b). Esses resultados mostram a operação dos sensor com uma resolução de temperatura de 5 °C e sensibilidade de $0,00758 \pm 2 \times 10^{-4} \text{ dB/}^\circ\text{C} @ 100 \text{ ns}$.

Figura 33 – Curvas OTDR do sinais anti-Stokes retroespalhados (a) e distribuição espacial de temperatura (b), para temperaturas entre -196,15°C e -0,8 °C, 150 m de fibra óptica, pulsos-OTDR de 100 ns.

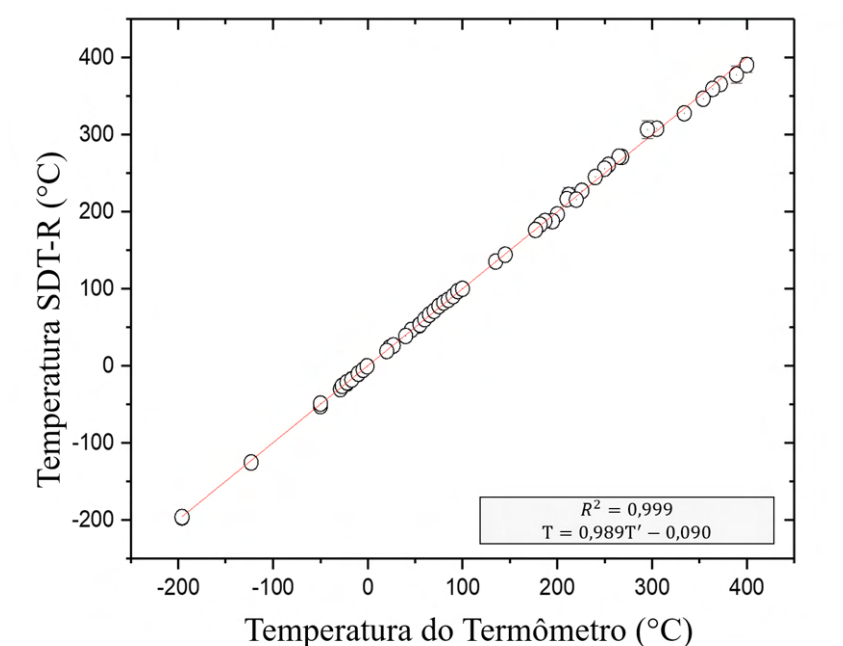


Fonte: o autor, 2023.

A Figura 34 mostra a correspondência entre as medidas de temperatura obtidas usando o SDT-R e as temperaturas aferidas com o termômetro durante os experimentos, para os processos

de aquecimentos e resfriamento da fibra. Pode-se observar a alta linearidade da resposta do sensor, que evidencia a boa concordância dos resultados do SDT-R com os dos sensores eletrônicos comerciais. O ajuste da regressão linear aos pontos, mostrada na Figura 5, tem um coeficiente de correlação de 99,9 % .

Figura 34 – Correlação entre temperaturas estimadas pelo SDT-R e temperaturas aferidas com um termômetro com o ajuste de regressão de primeira ordem.



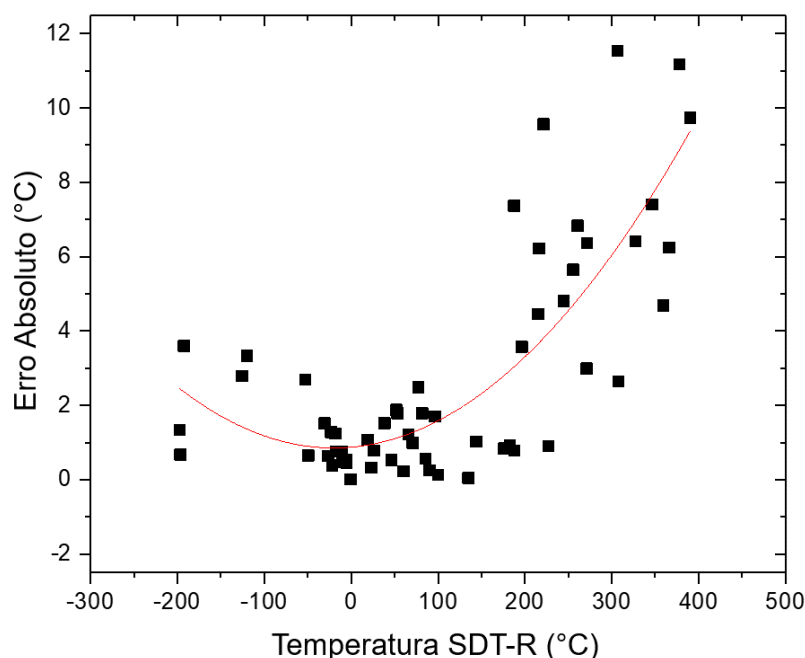
Fonte: o autor, 2023.

Um aspecto relevante em sistemas SDT-R é que, para altas temperaturas, a degradação da fibra é um problema significativo (BOLOGNINI; HARTOG, 2013). Em ambientes de altas temperaturas, moléculas de hidrogênio podem ser propagadas através de diferentes barreiras do revestimento da fibra óptica, e penetrar no material da fibra, reagindo com os átomos de oxigênio do vidro (SiO_2) para formar ligações de OH^- , os quais apresentam fortes picos de absorção em determinados comprimentos de onda comuns em sistemas DTS, em torno de $1-1,5 \mu m$. O aumento das perdas ópticas, decorrente desses novos comprimentos de onda de absorção, contribui para a degradação da resolução de temperatura da medição (BOLOGNINI; HARTOG, 2013). Além disso, a alteração na atenuação diferencial afeta a calibração do sistema (BOLOGNINI; HARTOG, 2013). Comumente, esses efeitos prejudicam o desempenho DTS (BOLOGNINI; HARTOG, 2013). Contudo, a compreensão dos mecanismos de danos residuais nessas fibras, e de como esses afetam a medida de temperatura, permite que o sistema sensor seja explorado para aplicações mais favoráveis, e para criação de estratégias que contornem essas limitações.

A Figura 35 mostra a precisão do sensor, em termos de erro absoluto, nos pontos de temperaturas medidos a partir do SDT-R apresentado na Figura 34, isto é, a capacidade do sensor

de produzir medições precisas e confiáveis. A Figura 35 mostra como a precisão da temperatura é afetada em toda a faixa de -196 até $+400$ °C. Observa-se que, para temperaturas extremas, as perdas ópticas adicionais ao sinal de propagação levam a uma maior imprecisão da medida de temperatura, em relação as medidas de temperatura entre -50 °C e 100 °C. Essas características são enfatizadas pela curva de ajuste ao pontos, mostrada na Figura 35, que ilustra tendência do erro absoluto como uma função da temperatura para os resultados experimentais apresentados. Esses resultados mostram que o sensor é capaz de realizar medições de boa qualidade, atingindo o erro máximo de $11,54$ °C para a temperatura de aproximadamente 305 °C, que apresenta um erro relativo de $3,76\%$. Além disso, o erro relativo máximo alcançado é de $8,17\%$, para temperaturas entre -60 °C e 85 °C, e de $4,32\%$ para a demais faixas de temperatura.

Figura 35 – Precisão do sensor em termos de erro absoluto em função da temperatura medida com SDT-R.



Fonte: o autor, 2023.

4.3 CONCLUSÕES

Os resultados experimentais de um sensor de fibra óptica para monitoramento distribuído de temperatura foram apresentados. Esse sistema sensor baseia-se no espalhamento Raman espontâneo em fibras ópticas monomodo padrão e foi implementado utilizando um equipamento OTDR comercial e um amplificador EDFA padrão. O desempenho do sensor foi avaliado experimentalmente em uma ampla faixa de temperatura, mantendo o link do sensor sob aquecimento até 400 °C e resfriamento até $-196,15$ °C. Análises foram realizadas para avaliar a

integridade do link do sensor de fibra sob altas temperaturas e temperaturas criogênicas, bem como o uso de fibras especiais, através da avaliação de uma fibra óptica monomodo revestida com uma camada de alumínio de $13 \mu\text{m}$ de espessura, indicada para operação em alta faixa de temperatura. Foi observado que baixas temperaturas não causaram danos estruturais ou mudanças perceptíveis na propagação de luz na fibra. No entanto, para temperaturas acima de 160°C , mudanças relevantes foram observadas no revestimento de acrilato da fibra padrão. Para fibras revestidas com metal, em temperaturas acima de 220°C , houve uma mudança estrutural na camada de revestimento metálico. Além disso, os resultados mostram que a sensibilidade do sensor é de $0,01 \text{ dB}/^{\circ}\text{C}$ @ 100 ns e a resolução do sistema é de 5°C para toda a faixa de temperatura estudada, de -196 a $+400^{\circ}\text{C}$. A precisão do sensor é de $\pm 5^{\circ}\text{C}$ na faixa de -196 a $+187^{\circ}\text{C}$, mas pode chegar $\pm 11,5^{\circ}\text{C}$ em temperaturas próximas a 400°C .

Esses resultados indicam a viabilidade da operação do sensor de temperatura distribuído feito de fibras ópticas padrão em uma ampla faixa de temperatura, sendo potencialmente útil para aplicações em processos industriais de temperatura criogênica, em estruturas supercondutoras de baixa temperatura, no monitoramento de temperatura de poços de petróleo e em aplicações de alta variação de temperatura, como em veículos espaciais e satélites.

5 SENSOR À FIBRA ÓPTICA MULTIPARÂMETRO PARA O MONITORAMENTO SIMULTÂNEO DE TEMPERATURA, ÍNDICE DE REFRAÇÃO E CORROSÃO BASEADO EM RAMAN ANTI-STOKES

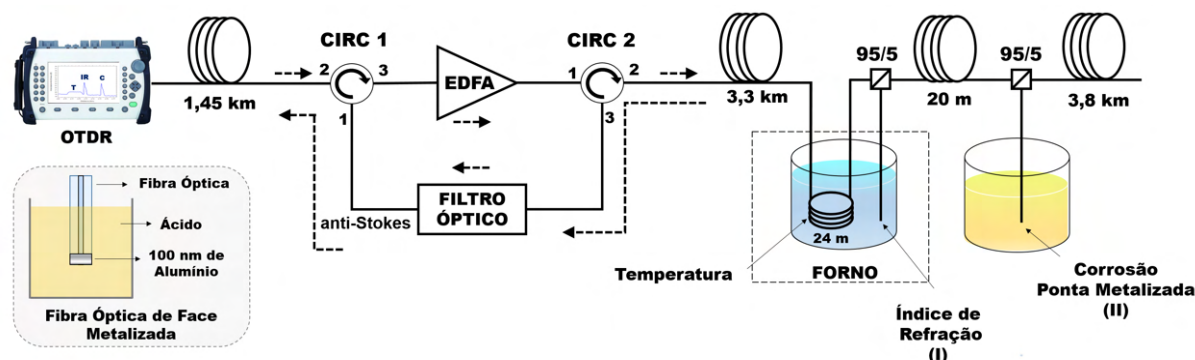
Neste Capítulo, é proposto e demonstrado experimentalmente um novo sensor de fibra multiparâmetro baseado em reflectometria Raman anti-Stokes no domínio do tempo, com a capacidade de monitorar simultaneamente temperatura, corrosão e índice de refração. Na Seção 5.1, são apresentados os detalhes da configuração experimental utilizada para implementar o sistema de detecção multiparâmetro baseado em Raman. Além disso, na Seção 5.1, é descrito o processo de fabricação dos elementos transdutores de corrosão, com destaque para as etapas envolvidas na metalização das facetas das fibras ópticas, e na caracterização desses elementos sensores. Em seguida, na Seção 5.2, são apresentados os resultados experimentais obtidos para o sensor distribuído multiparâmetro, abrangendo temperatura, índice de refração e corrosão. Por fim, na Seção 5.3, são elaboradas as conclusões referentes a este capítulo.

5.1 CONFIGURAÇÃO EXPERIMENTAL

O sistema sensor proposto neste capítulo utiliza espalhamento Raman em fibras ópticas para monitorar simultaneamente múltiplos parâmetros: temperatura, índice de refração e corrosão. Nesse sistema, a temperatura é monitorada de forma distribuída ao longo do comprimento do link sensor, enquanto o índice de refração e a corrosão são monitorados em pontos específicos, em um formato multiponto. A configuração experimental ilustrada na Figura 36 é empregada para implementar o sensor multiparâmetro. Nessa configuração, as cabeças sensoras I e II são especificamente designadas para medir o índice de refração e a corrosão, respectivamente. O sistema proposto apresenta semelhanças com o sistema de detecção de temperatura distribuída baseada em Raman esquematizado na Figura 24, e discutido na Seção 4.1.1. No entanto, a inovação desse sistema reside na incorporação de novas funcionalidades à capacidade de detecção existente.

Na configuração ilustrada na Figura 36, um equipamento OTDR comercial (Anritsu MT9083C2) é utilizado para emitir pulsos de luz com uma largura temporal de 10 ns, operando na faixa de comprimento de onda de 1550 nm. Esses pulsos são amplificados por um amplificador de fibra dopada com érbio (EDFA) e enviados para o link do sensor de fibra óptica por meio de circuladores ópticos. A implementação do amplificador EDFA segue o esquema mostrado

Figura 36 – Configuração experimental utilizada para implementar o sistema de sensores baseado em Espalhamento Raman em fibras ópticas para monitoramento simultâneo de temperatura, índice de refração e corrosão.



Fonte: o autor, 2023.

na Figura 24-(b), que envolve o uso de 10 metros de fibra óptica dopada com érbio (do tipo M-3 1480/125), um diodo laser de bombeamento de 980 nm, um acoplador de fibra e isoladores ópticos. O EDFA foi configurado para gerar uma potência óptica de saída de 18 dBm, usando uma potência de bombeamento de 36,5 mW. Essa configuração específica foi ajustada para atender aos requisitos de potência desejados no sistema, garantindo um desempenho adequado e eficiente. Os pulsos OTDR amplificados são propagados pela fibra óptica, estimulando a geração de espalhamento Raman espontâneo. Para direcionar o sinal óptico estimulado, dois circuladores ópticos (CIRC 1 e CIRC 2) são utilizados para o envio e o retorno desse sinal. Os sinais retroespalhados e refletidos ao longo de todo o link do sensor são filtrados por um filtro óptico passa-faixa (1400-1480 nm), que separa a banda anti-Stokes e evita contribuições da banda Stokes e da emissão espontânea amplificada (ASE) no sinal de interesse, que é enviado de volta ao OTDR. Nesse sistema, o foco está exclusivamente nos sinais de retorno Raman anti-Stokes. Esses sinais são de interesse principal, pois contêm informações sobre os parâmetros que estão sendo monitorados. Os traços OTDR dos sinais detectados são então registrados e armazenados para posterior processamento e análise. Para a montagem do link do sensor, são utilizados quatro carretéis de fibra óptica monomodo padrão, cada um comprimento específico (3,3 km, 0,024 km, 0,02 km e 3,8 km), (esses valores podem ser alterados para realizar testes específicos). Essas fibras possuem coeficientes de atenuação em 1550 nm de aproximadamente 0,19 dB/km. Os comprimentos das fibras foram escolhidos com o intuito de compor um sistema de longa distância, levando em consideração as especificações e requisitos do sistema sensor. Além disso, a disponibilidade de carretéis de fibra no laboratório também influenciou na escolha desses comprimentos.

O carretel de fibra óptica com comprimento de 24 m foi inserido em um ambiente com temperatura controlada, especificamente um forno mufla, para simular variações de temperatura. Essa configuração permite avaliar o desempenho do sistema sensor em diferentes condições

térmicas. Enquanto isso, o restante do link de fibra foi mantido em temperatura ambiente. Para direcionar uma pequena fração (5%) do sinal óptico incidente para as cabeças sensoras I e II, são utilizados dois divisores ópticos com uma relação de divisão de 95/5. Esses divisores direcionam a maior parte do sinal para o sistema principal, enquanto uma pequena porção é desviada para as cabeças sensoras I e II. Essa abordagem (proporção - 95/5) foi adotada para assegurar que os sinais monitorados pelos sensores I e II sejam representativos, sem comprometer a detecção nas demais regiões do sistema, permitindo uma análise precisa de todos os parâmetros monitorados. Ou seja, a potência óptica do sinal direcionado para os sensores I e II não afeta negativamente a medição nas outras partes do link do sensor. Para a separação dos divisores, foi utilizado um trecho de fibra óptica com 2 metros de comprimento, resolvendo a região entre eles de acordo com os requisitos de resolução do OTDR espacial, que são aproximadamente 1 metro, e evitando interferências nos sinais detectados.

A cabeça sensora I foi projetada para monitorar o índice de refração e é composta por uma extensão de fibra óptica monomodo com extremidade clivada perpendicularmente. Essa configuração permite criar uma interface plana entre a fibra óptica e o meio externo. Para o monitoramento da corrosão, a cabeça sensora II foi implementada com uma camada de alumínio de 100 nm depositada na faceta clivada da fibra por meio de um processo de deposição de filme fino utilizando o sistema de deposição DC Magnetron Sputtering (KELLY; ARNELL, 2000). O processo de fabricação detalhado do sensor de corrosão será abordado em seguida.

A detecção do índice de refração é realizada com o elemento sensor inserido em diferentes meios líquidos, conforme mostrado na Figura 36. Cada um desses meios possui valores distintos para o índice de refração na faixa do comprimento de onda correspondente ao sinal anti-Stokes (1450 nm). Um carretel de fibra foi projetado para o monitoramento da temperatura do líquido, e possui dimensões que permitem sua acomodação no recipiente da solução sob teste. Esse carretel tem aproximadamente 7 cm de diâmetro e é composto por uma fibra óptica monomodo padrão com 24 metros de comprimento. Essa unidade de detecção foi inserida em um forno mufla, com controle de temperatura e isolamento térmico. Nos testes experimentais, o líquido foi aquecido a temperaturas que variavam entre 30 °C e 53 °C. Essa faixa de temperatura foi selecionada para preservar a concentração das soluções utilizadas ao longo dos testes. Para avaliar o monitoramento da corrosão, a cabeça sensora II foi imersa em uma solução ácida com o intuito de acelerar e simular, em ambiente laboratorial, a corrosão da camada metálica na face da fibra. A escolha do ácido utilizado foi baseada em sua taxa de corrosão conhecida, considerando o tempo estimado para a corrosão do alumínio e a viabilidade dos testes experimentais no ambiente de laboratório.

Conforme ilustrado na Figura 36, a estrutura do sistema sensor é composta por sensores multiplexados no domínio do tempo, os quais são baseados na modulação da intensidade da luz refletida ou retroespalhada devido a mudanças em fenômenos físicos ou químicos externos. Todo o sistema é fundamentado nas variações de intensidade do sinal anti-Stokes Raman que

se propaga em sentido contrário ao sinal da fonte, ou seja, no sentido contrapropagante. Essas variações são interrogadas e analisadas por um equipamento OTDR comercial, permitindo o monitoramento simultâneo dos três parâmetros ao longo de um único link sensor de fibra óptica de grande extensão. O uso de um sistema de interrogação único para o monitoramento simultâneo de vários parâmetros em um link de fibra longo (de quilômetros) é uma vantagem significativa desse sistema.

5.1.1 Processo de Fabricação de Fibras Ópticas com Camada Metálica

A utilização de fibras ópticas com camadas metalizadas de alumínio como elementos sensores de corrosão leva em consideração diversos fatores. Estes incluem a abordagem experimental bem-sucedida proposta por Martins-Filho, et al., e Nascimento et al., que utilizam sistemas de detecção de corrosão por fibra óptica com técnicas como OTDR e OTDR amplificado (MARTINS-FILHO et al., 2007; MARTINS-FILHO; FONTANA, 2009; NASCIMENTO et al., 2012). Esses estudos demonstraram êxito no monitoramento multiponto da corrosão utilizando fibras ópticas com camada metalizada de alumínio, com espessura de 100 nm, semelhantes aos sensores de corrosão aplicados neste trabalho. Além disso, a facilidade de fabricação e a versatilidade de aplicações são características importantes desses sensores de corrosão baseados em fibras ópticas metalizadas.

Antes de realizar o processo de metalização das fibras ópticas, é necessário estabelecer alguns parâmetros essenciais, como o tipo de metal a ser depositado nas faces das fibras, a espessura desse metal e o método de deposição utilizado (KELLY; ARNELL, 2000). Neste estudo, o metal escolhido para a construção do elemento sensor de corrosão é o alumínio (Al). Existem três motivos principais que sustentam essa escolha. Primeiro, na indústria de Petróleo e Gás, o alumínio é amplamente utilizado como um metal de sacrifício para proteger estruturas e peças metálicas (HEIDERSBACH, 2011; POPOOLA et al., 2013). Essa propriedade torna o alumínio uma opção ideal para utilização em sensores, pois ele é um material alvo para a supervisão em uma variedade de estruturas, onde a monitorização da corrosão é necessária. Em segundo lugar, o alumínio possui a propriedade de se evaporar termicamente facilmente. Isso significa que, quando exposto a altas temperaturas, o alumínio evapora de forma eficiente, o que pode ser muito vantajoso em certos processos de deposição de materiais. Por fim, a simplicidade de manipulação do alumínio é um fator importante. O material possui uma taxa de corrosão bem definida para ácidos específicos relacionados à corrosão do alumínio. Além disso, não é necessário um ambiente exclusivo para trabalhar com esses ácidos, tornando seu manuseio mais conveniente (NASCIMENTO, 2013).

A espessura do filme desempenha um papel crucial na faixa de detecção de uma estrutura de fibra óptica de camada metálica. Isso decorre do comportamento da luz quando atinge a superfície metálica. A intensidade da luz incidente diminui exponencialmente à medida que atravessa o metal, resultando em uma transmissão de luz com menor intensidade. Essa redução

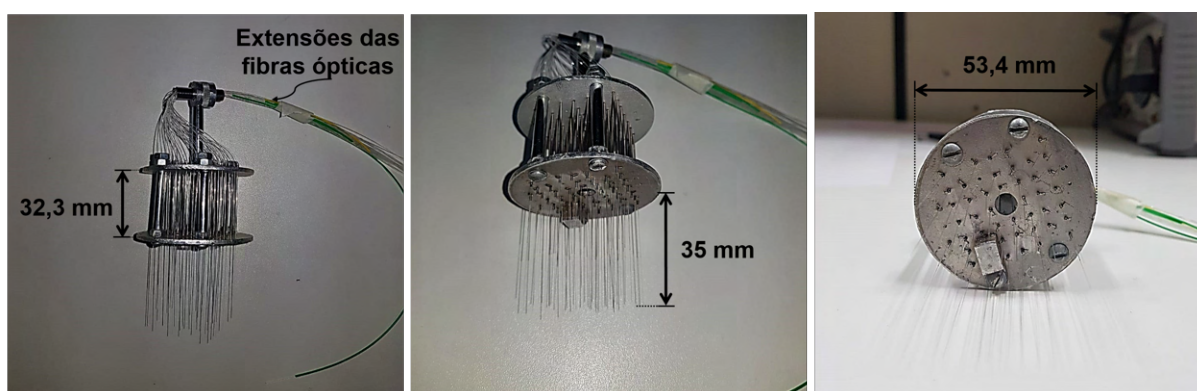
está diretamente relacionada à espessura do metal, ao comprimento de onda da luz incidente e ao coeficiente de extinção (STENZEL et al., 2015).

Outro fator importante é a profundidade de penetração da luz, que representa a distância que a luz percorre no metal antes de ser absorvida de maneira significativa (STENZEL et al., 2015). A alteração na intensidade da luz está diretamente vinculada a essa profundidade de penetração. Portanto, existe um valor crítico de espessura do material, no qual espessuras superiores resultam em uma refletividade constante, enquanto espessuras inferiores causam alterações simultâneas na refletividade da luz e no processo corrosivo.

Considerando esses aspectos, juntamente com a faixa de operação do sensor e estudos anteriores mencionados na literatura, a espessura do filme de alumínio utilizada no sensor é de 100 nm. Essa escolha visa obter um desempenho ótimo em termos de detecção, utilizando o estrutura mencionada.

O processo de construção do sensor óptico com filme fino de alumínio consiste em duas etapas: i) preparação da amostras e ii) deposição da camada metálica. Para preparar as amostras foram utilizados prolongamentos de fibras ópticas monomodo padrão, com extensão de um metro. Essas fibras foram submetidas a um procedimento de limpeza e clivagem e, posteriormente, foram inseridas em um suporte especialmente projetado para acomodar até 48 fibras. O suporte contendo as fibras ópticas foi submetido ao procedimento de metalização das faces, utilizando um equipamento de metalização por sputtering. A Figura 37 mostra o suporte metálico utilizado após o processo de deposição do alumínio, onde as facetas das fibras já estão metalizadas.

Figura 37 – Suporte para fibras ópticas com revestimento metálico.



Fonte: o autor, 2023.

A deposição por sputtering foi realizada no Departamento de Física da UFPE (Universidade Federal de Pernambuco). O equipamento utilizado para realizar a deposição de filmes finos metálicos por sputtering é um Balzers-Pfeffer modelo PLS 500. Esse equipamento possui uma câmara de vácuo com quatro eletrodos, um bloqueador e um suporte em forma de disco onde as amostras são colocadas.

No processo de deposição por sputtering, a superfície a ser revestida, incluindo as fibras ópticas e o suporte metálico, é colocada diante de um alvo. Esse alvo está posicionado em um dos eletrodos designados. Um bloqueador, que cobre os eletrodos, desempenha a função de selecionar o eletrodo que será utilizado para a deposição do metal. As amostras são posicionadas em uma base no suporte, que fica acima do bloqueador dos eletrodos. Quando um plasma de íons é gerado e o alvo é bombardeado, os átomos do metal depositam-se nas facetas das fibras ópticas e na superfície do suporte, formando assim uma camada fina de metal. Esse método permite a criação de revestimentos metálicos uniformes e aderentes (KELLY; ARNELL, 2000).

A deposição do alumínio foi executada em uma pressão de vácuo na câmara de Edwards de cerca de $3,4 \times 10^{-6}$ Torr e na câmara Balzers de aproximadamente $8,8 \times 10^{-6}$ Torr, com uma taxa de deposição do material de 4,3 nm/min.

5.1.1.1 Caracterização Experimental das Fibras Ópticas Metalizadas

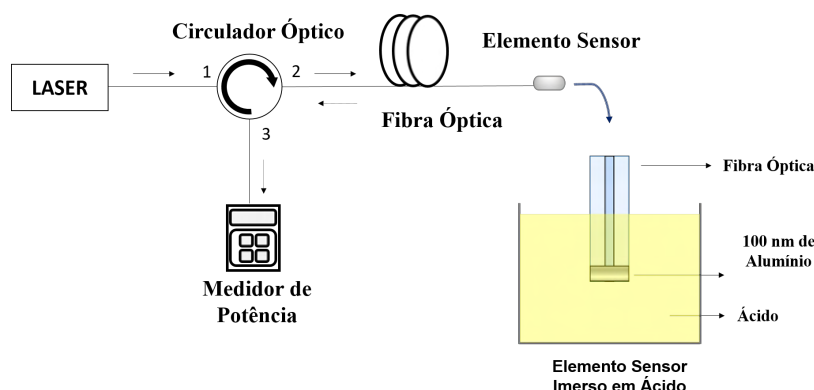
Nesta seção, apresentam-se os resultados experimentais da caracterização das fibras ópticas de camada metálica usadas neste trabalho como cabeças sensoras de corrosão, cujo processo de fabricação foi descrito na Seção 5.1.1. Através dessa caracterização, é possível calibrar e validar os sensores de corrosão, estabelecendo uma relação entre a resposta do sensor e o nível real de corrosão no sistema. Além disso, é possível avaliar a qualidade e a uniformidade das amostras produzidas. Para isso, realizou-se a corrosão controlada das amostras por diferentes ácidos. Essa caracterização permite estabelecer uma base comparativa entre os resultados obtidos, avaliando a performance do sensor multiparâmetro proposto neste trabalho no monitoramento da corrosão, incluindo medidas como taxa de corrosão. Nesse processo, foram utilizadas fibras ópticas sob as mesmas condições, submetidas à corrosão acelerada em ambiente de laboratório utilizando os mesmos ácidos.

O aparato experimental utilizado para a caracterização das fibras metalizadas é apresentado na Figura 38. Consiste em um laser acoplado ao elemento sensor (fibra óptica com face metalizada), por meio de um circulador óptico, e um medidor de potência óptica. O laser utilizado é um laser sintonizável com potência óptica de 10 mW, operando no comprimento de onda de 1550 nm. Tanto o circulador quanto a fibra óptica são dispositivos padrões utilizados na indústria de telecomunicações.

No sistema experimental (Figura 38), a luz emitida pelo laser é direcionada para a região sensora através do circulador óptico, o qual também é responsável por redirecionar a luz refletida nessa região para o medidor de potência. Os dados coletados pelo medidor de potência são armazenados para posterior análise e processamento, a fim de determinar a taxa de corrosão do alumínio.

Os experimentos de corrosão em laboratório são conduzidos com o elemento sensor imerso em soluções ácidas adequadas para o ataque ao alumínio e com taxas de corrosão

Figura 38 – Configuração experimental usada para caracterizar as amostras de fibras de camada metálica com 100 nm de Al, metalizadas por sputtering.



Fonte: o autor, 2023.

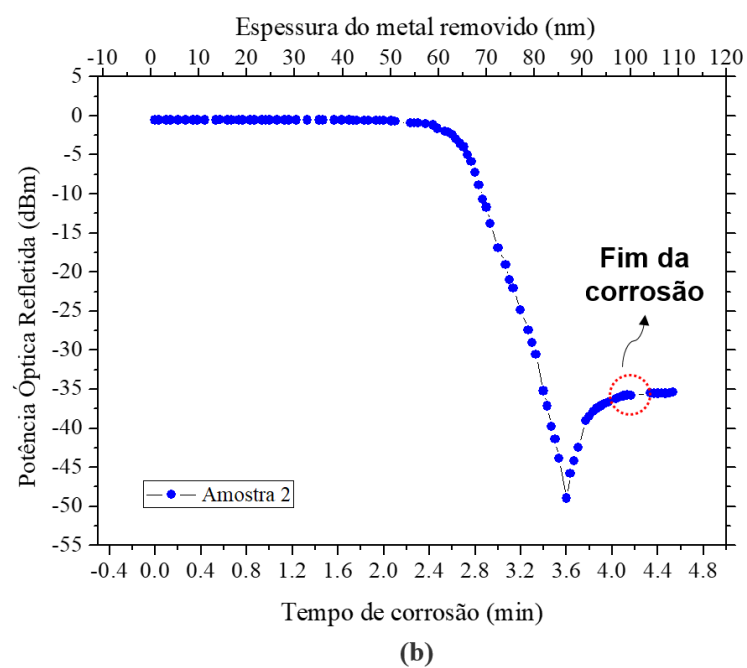
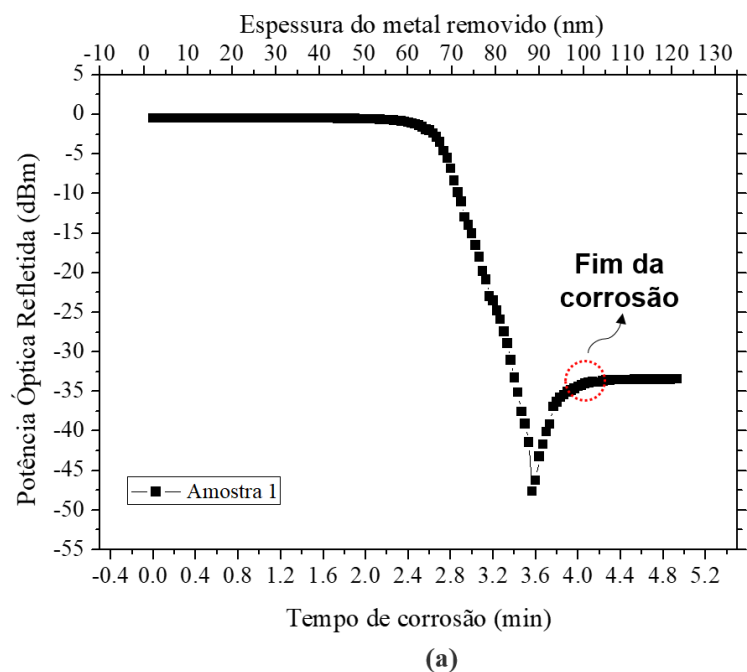
conhecidas. Durante os experimentos, a fibra óptica é imersa no agente corrosivo por tempo suficiente para permitir a corrosão completa do alumínio, identificado pelo momento em que a medida da potência óptica da luz refletida se estabiliza. Esse procedimento é repetido para todas as amostras e ácidos utilizados no estudo. Após a conclusão de cada experimento, a amostra testada é descartada, não sendo reutilizada nos testes subsequentes.

É relevante enfatizar que as fibras ópticas metalizadas utilizadas nos testes experimentais foram provenientes do mesmo lote de fabricação, ou seja, foram fabricadas simultaneamente na mesma câmara de sputtering. Além disso, foram selecionadas amostras de diferentes pontos do suporte ilustrado na Figura 37, mencionada na Seção 5.1.1 sobre a configuração de fabricação.

As Figuras 39 (a) e (b) apresentam os gráficos da potência óptica da luz refletida em função do tempo de corrosão para duas amostras diferentes. Uma das amostras foi obtida na região próxima à borda do suporte, enquanto a outra amostra foi retirada da região central do suporte (Figura 37). Esses resultados foram obtidos utilizando o ácido Al-Etch como agente corrosivo, com composição química de (25H₂PO₄ : 1NH₃ : 5CH₃COOH) e uma taxa de corrosão esperada de 50 nm/min para o alumínio (MARTINS-FILHO et al., 2007; HEIDERSBACH, 2011).

Na Figura 39, é possível observar a diminuição da potência óptica refletida à medida que ocorre a corrosão da camada metálica em ambas as amostras. Nos primeiros 2,5 minutos aproximadamente, tanto para a amostra 1 quanto para a amostra 2, não são observadas alterações significativas na potência óptica refletida, devido à espessura substancial da camada de alumínio. Após esse período inicial, a potência óptica diminui para um valor mínimo e, em seguida, se estabiliza em um nível constante. Essa estabilização indica que o processo de corrosão do alumínio na face da fibra foi concluído. A variação de potência ao longo de todo esse processo é de aproximadamente 34 dBm. Além disso, o nível mínimo de refletância observado sugere que o vale está associado aos efeitos de espalhamento da luz e ao acoplamento de

Figura 39 – Potência óptica refletida em função do tempo de corrosão para duas amostras de fibras metalizadas com 100 nm de Al no Al-Etch.



Fonte: o autor, 2023.

plásmon de superfície (FONTANA; PANTELL, 1988; ALVES et al., 2018). Esses efeitos são consequências da formação de rugosidade na superfície do filme metálico causada pelo processo

de corrosão (ALVES et al., 2018).

Para calcular a taxa de corrosão, considera-se a espessura do metal depositado e o tempo necessário para atingir o nível constante. No caso da amostra 1, o tempo total de corrosão foi de 246 segundos (4,1 minutos), enquanto para a amostra 2, o tempo total de corrosão foi de 260 segundos (4,3 minutos). Portanto, a taxa de corrosão calculada para as amostras foi de 24,39 nm/min e 23,80 nm/min, respectivamente. Esses resultados evidenciam a consistência das amostras testadas.

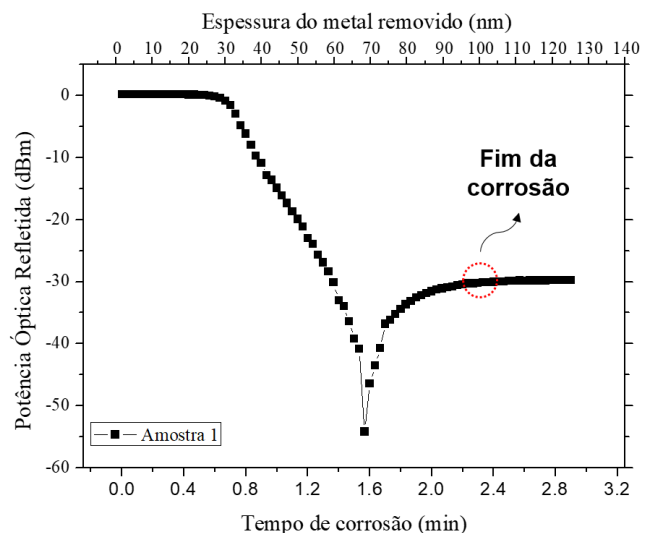
As Figuras 40 (a) e (b) apresentam os resultados da caracterização das fibras metalizadas utilizando o ácido Si Iso etch como agente corrosivo. Esse ácido possui uma composição química de (126 HNO₃ : 60 H₂O : 5 NH₄F) e uma taxa de corrosão estimada de 60 nm/min para o alumínio (HEIDERSBACH, 2011). Conforme esperado, a potência óptica da luz refletida decai a medida que o tempo de corrosão aumenta, isto é, conforme a espessura da alumínio diminui. Nesse caso, a resposta óptica obtida para as amostras difere ligeiramente na faixa de sensibilidade do sensor. Essa diferença no processo de corrosão pode ser causada por não uniformidades da estrutura dos metais depositados, ou por agitação da amostra, ou outras variações das condições do agente corrosivo durante a corrosão. Apesar disso, os resultados demonstram consistência. Para a amostra 1, o tempo total de corrosão foi de 136 segundos (2,27 min), enquanto para a amostra 2, esse tempo foi de 124 segundo (2,06 min). As taxa de corrosão do alumínio para as amostras são de 44,11 nm/ min e de 48,4 nm/ min, respectivamente.

As discrepâncias entre as taxas de corrosão medidas e as esperadas podem estar relacionadas à concentração e ao nível de pureza de cada componente presente na solução ácida (OLIVEIRA et al., 2021; FREDJ et al., 2012). A composição química precisa da solução ácida e a qualidade dos reagentes utilizados podem afetar a taxa de corrosão do alumínio. Além disso, é importante considerar que a taxa de corrosão do alumínio pode variar com o tempo de exposição, as condições ambientais e outros fatores podem afetar a cinética da corrosão e resultar em variações na taxa observada (REVIE, 2008).

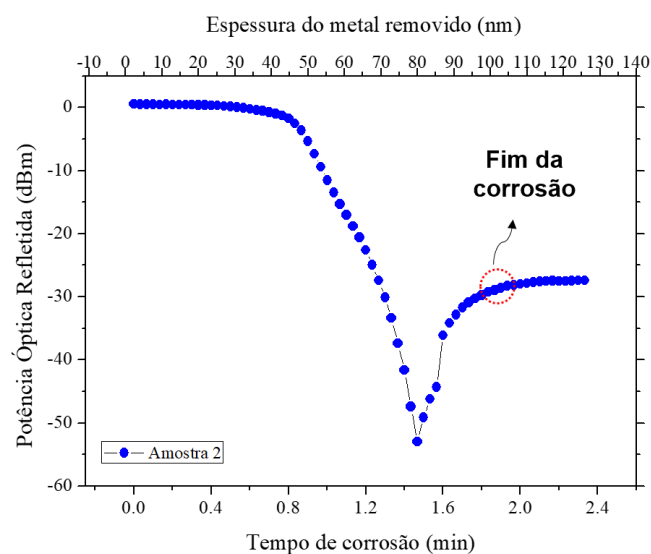
5.2 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção, é apresentado o conjunto de resultados experimentais para o sensor multiparâmetro proposto nesta tese. As medições simultâneas de temperatura, índice de refração e corrosão foram obtidas a partir dos traços de OTDR da fibra do sensor, usando OTDR comercial em combinação com um EDFA, utilizando a configuração experimental apresentada na Figura 36, mantendo cerca de 24 m de fibra óptica sob aquecimento, em uma faixa de temperatura de 30 °C a 100 °C. O OTDR fornece curvas de intensidade dos sinais ópticos retroespalhados em relação à distância ao longo de todo o comprimento da fibra do sensor. As curvas de intensidade são obtidas em um tempo médio de 3,5 minutos, com uma densidade de 25001 pontos, e o OTDR é configurado para pulsos de luz de 10 ns com um alcance de distância de 5 km. No presente

Figura 40 – Potência óptica refletida em função do tempo de corrosão para duas amostras de fibras metalizadas com 100 nm de Al no Si Iso etch.



(a)



(b)

Fonte: o autor, 2023.

sistema, o tempo médio de medição foi reduzido para se adequar aos requisitos decorrentes da ação corrosiva durante os experimentos, que ocorre em um ritmo acelerado. Esse intervalo de tempo foi determinado com base em testes prévios, a fim de encontrar um valor que não compromettesse significativamente a precisão da temperatura, mas permitisse o armazenamento de múltiplos traços OTDR durante a medição, para monitorar em tempo real todo o processo corrosivo.

Utilizando o sistema ilustrado na Figura 36, foi possível obter a distribuição espacial de temperatura da fibra do sensor por meio dos traços OTDR do sinal retroespalhado anti-Stokes Raman. Esse processo foi realizado utilizando um sistema de calibração para temperaturas conhecidas, onde um traço de referência foi utilizado para calibrar o sistema e mitigar os efeitos da atenuação diferencial na variação do comprimento de onda do sinal. Isso foi alcançado mantendo os mesmos parâmetros de projeto, juntamente com a aplicação de etapas de processamento dos dados. Simultaneamente, os índices de refração das soluções foram medidos a partir da reflexão de Fresnel da luz anti-Stokes na ponta da fibra em contato com substâncias de diferentes índices de refração. No sistema da Figura 36, as variações na intensidade óptica da luz refletida na cabeça sensora I são os indicadores para medir o índice de refração, como descrito na Seção 2.5. Esse processo ocorre em um ponto específico do traço OTDR, que é a posição da cabeça sensora. Utilizando essa localização, podemos obter a intensidade relativa entre o pico e um vale adjacente nos traços OTDR registrados. Essa medida é imune a mudanças imprevisíveis ou não intencionais nos valores de intensidade, ou seja, é uma medida autorreferenciada (NASCIMENTO et al., 2012). Para a medição do índice de refração de diferentes soluções aquosas, utilizou-se um sistema de calibração baseado em uma medida de referência obtida a partir de uma amostra com índice de refração conhecido, como a água deionizada. Além disso, foram realizadas etapas específicas de processamento de dados para obter os resultados.

O sistema Raman - OTDR da Figura 36 também pode ser empregado para monitorar simultaneamente a corrosão na cabeça sensora II. Nesse sistema, as variações na intensidade da luz anti-Stokes, refletida na região do elemento sensor II, são utilizadas como indicadores da redução da camada metálica na ponta da fibra durante um processo corrosivo, sendo assim utilizadas para monitorar a corrosão. Além disso, o monitoramento da corrosão é conduzido de maneira autorreferenciada, baseando-se nas variações relativas na intensidade da luz anti-Stokes refletida na região do sensor II.

A Figura 41, apresenta os traços OTDR para 100 m de fibras do link sensor sob teste. O enlace é constituído pela cabeça sensora I imersa em uma solução com um índice de refração de 1,35 UIR (Unidades de Índice de Refração) a temperatura ambiente, uma cabeça sensor II em processo de corrosão e 24 m de fibra óptica mantidos a uma temperatura constante de 55 °C, localizados a aproximadamente 4,71 km do ponto inicial do enlace de fibra. O restante do enlace de fibra está mantido à temperatura ambiente.

As larguras dos picos correspondentes às cabeças dos sensores I e II na Figura 41, que são estruturas refletoras discretas, estão limitadas pela resolução espacial do OTDR, a qual é de aproximadamente 1 metro para a largura de pulso óptico de 10 ns utilizada nos experimentos. Essa resolução espacial determina a capacidade do OTDR em distinguir e localizar com precisão as estruturas refletoras ao longo da fibra.

No caso das medições de temperatura, o sensor é distribuído, o que permite a obtenção da temperatura ao longo de todo o comprimento da fibra, em vez de pontos discretos como nas

cabeças sensoras I e II. Essa característica do sensor de temperatura permite uma caracterização contínua da variação térmica ao longo de todo o link de fibra, abrangendo também as regiões próximas aos elementos sensores I e II.

A largura do patamar observado em torno de 4,71 km na Figura 2 é determinada pelo comprimento da fibra submetida à variação de temperatura, que foi de 24 metros. Esse comprimento representa a extensão da região aquecida do experimento, na qual ocorre a variação térmica controlada.

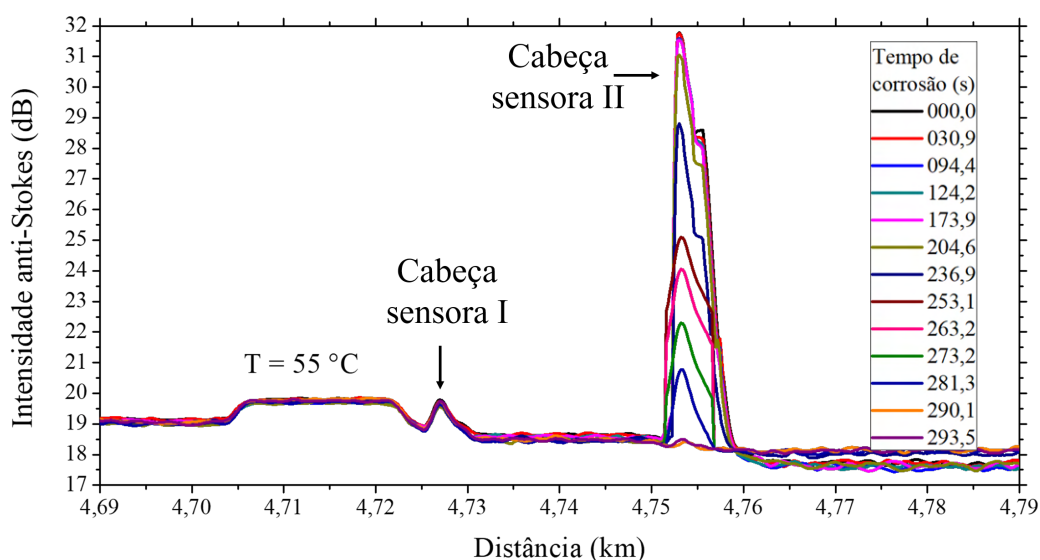
Nos experimentos, a corrosão foi conduzida de maneira controlada, em ambiente de laboratório, utilizando-se ácido Al-etcher ($25\text{H}_2\text{PO}_4:1\text{HNO}_3:5\text{CH}_3\text{COOH}$) para corroer o filme de alumínio. O Al-etcher é amplamente utilizado no processo de microfabricação de dispositivos, onde o ácido nítrico (HNO_3) desempenha um papel importante ao acelerar a oxidação do alumínio, resultando na formação do óxido de alumínio (Al_2O_3). Por sua vez, o ácido fosfórico (H_3PO_4) é responsável pela remoção do Al_2O_3 , enquanto o ácido acético (CH_3COOH) desempenha o papel de estabilizar o pH ácido da solução, o que influencia na taxa de corrosão do alumínio a uma determinada temperatura (KÖHLER, 2008). Como mencionado anteriormente, a taxa de corrosão esperada do Al-etcher, a temperatura ambiente (25°C), é de 50 nm/minuto (MARTINS-FILHO et al., 2007). A condução da corrosão é realizada mergulhando a cabeça sensora II, que contém o filme de alumínio, em ácido durante intervalos de tempo curtos, medidos em segundos, utilizando um cronômetro. Esse procedimento permite controlar e monitorar o processo corrosivo de forma sistemática e precisa.

Na Figura 41, é possível observar uma redução no nível de intensidade da luz refletida anti-Stokes na cabeça sensora II durante o processo corrosivo. Os resultados indicam que, até 173 segundos, não ocorrem alterações na intensidade da luz refletida detectada pelo OTDR, o que sugere a presença de uma camada de alumínio ainda espessa. A partir desse momento, a intensidade do sinal refletido diminui para um nível mínimo e constante, indicando o término do processo de corrosão da camada metálica. O tempo total de corrosão nesse caso foi de 4 minutos e 35 segundos. Ao final do processo de corrosão, não foram detectados resíduos ou materiais remanescentes na superfície da fibra óptica. A taxa de corrosão do alumínio pode ser calculada pela razão entre a espessura do metal removido durante o processo corrosivo e tempo de corrosão. No experimento realizado, a taxa de corrosão medida para o alumínio foi de 21,8 nm/minuto.

A Figura 42 apresenta a variação da intensidade refletida anti-Stokes em função da espessura do metal. Nessa figura, é observada uma redução de 13 dB no nível de intensidade da luz refletida, o que corresponde a uma sensibilidade de 0,76 dB/nm na faixa sensível. Essa sensibilidade é calculada considerando a região onde ocorrem as maiores variações de intensidade refletida.

Uma preocupação comum no desenvolvimento de sensores multiparâmetros é a ocorrência de interferência cruzada, que resulta da presença de efeitos distintos e simultâneos, especialmente quando a medição não ocorre em canais isolados ou quando o espaçamento

Figura 41 – Picos de intensidade de sinais Raman anti-Stokes na cabeça sensora I, imersa em solução de $n=1,3500$ URI, e cabeça sensora II, durante corrosão de alumínio 100 nm em ácido Al-etcher e região com 24 metros de fibra óptica monomodo mantida a $55\text{ }^{\circ}\text{C}$.



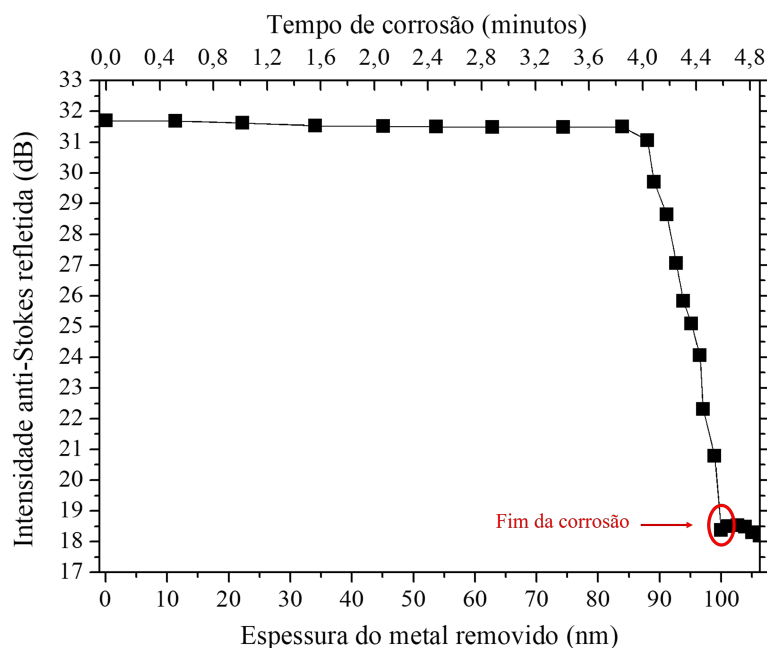
Fonte: o autor, 2023.

entre os sensores não é adequado (PEVEC; DONLAGIĆ, 2019). A interferência cruzada pode afetar a precisão e a confiabilidade das medições obtidas pelos sensores, prejudicando assim o desempenho do sistema como um todo. Uma estratégia para lidar com esse problema em sensores multiparamétricos é calibração individual dos sensores. As técnicas de calibração individual de cada sensor para garantir que suas respostas sejam precisas e confiáveis (PEVEC; DONLAGIĆ, 2021). Isso permitirá compensar eventuais desvios e minimizar a interferência cruzada.

Os resultados experimentais apresentados na Figura 43 demonstram a operação quando a cabeça sensora de corrosão está suficientemente próxima da região de aquecimento da fibra, respeitando as especificações de resolução espacial do OTDR. Nesses experimentos, a configuração experimental da Figura 36 foi ligeiramente alterada: a cabeça sensora II foi posicionada na região da cabeça sensora I, que foi removida do link sensor.

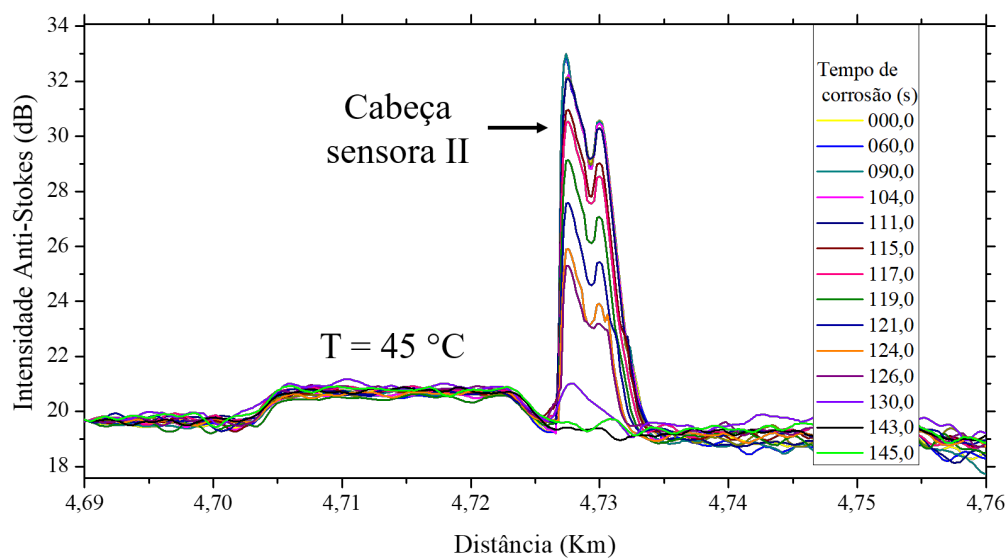
Nos experimentos realizados, um carretel de fibra óptica de 24 m foi mantido sob aquecimento regulado a uma temperatura de $45\text{ }^{\circ}\text{C}$. A corrosão do alumínio na cabeça sensora II foi conduzida de forma controlada em ambiente de laboratório, utilizando-se ácido Si Iso-Etch. O agente corrosivo conhecido como Si Iso Etch, ou Isotropic Silicon Etchant, possui uma composição química de (126 HNO_3 : 60 H_2O : 5 NH_4F). Esse agente é utilizado para o condicionamento isotrópico de silício, processo de remoção controlada de material de uma superfície, de maneira uniforme em todas as direções (WILLIAMS; GUPTA; WASILIK,

Figura 42 – Intensidade anti-Stokes relativa refletida na cabeça do sensor II em função da espessura da camada de alumínio removida durante a corrosão por Al-etcher.



Fonte: o autor, 2023.

Figura 43 – Picos de intensidade de sinais Raman anti-Stokes na cabeça sensora II, durante corrosão de alumínio 100 nm em ácido Si Iso-Etch e região com 24 metros de fibra óptica monomodo mantida a 45 °C.



Fonte: o autor, 2023.

2003; KÖHLER, 2008). No caso do silício, isso é especialmente importante em aplicações microeletrônicas e de fabricação de dispositivos semicondutores (WILLIAMS; GUPTA; WASILIK, 2003).

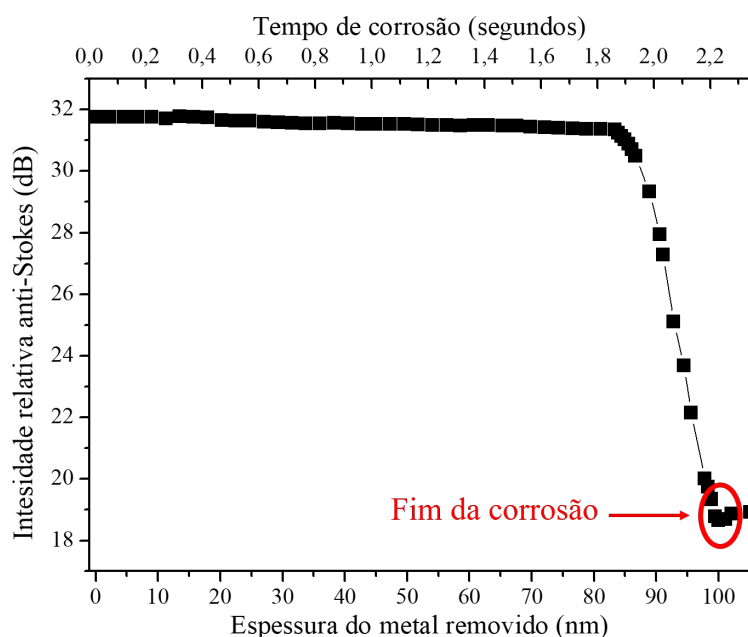
A taxa esperada para a corrosão do alumínio por Si Iso-Etch é de 60 nm/min, em temperatura ambiente (HEIDERSBACH, 2011). Levando em consideração a velocidade com que ocorre a corrosão, o tempo de média dos sinais anti-Stokes detectado pelo OTDR foi ajustado para 60 segundos. Esse ajuste foi realizado para garantir uma captura adequada dos sinais relevantes durante o processo. Os demais parâmetros do sistema não foram alterados, assim como o protocolo de medição permanece o mesmo.

Na Figura 43, é evidente a diminuição da intensidade dos sinais anti-Stokes refletidos na cabeça sensora II à medida que a corrosão ocorre. Ao mesmo tempo, observa-se que o nível de intensidade anti-Stokes na região de aquecimento permanece praticamente inalterado. A análise desses resultados demonstra de maneira clara que o OTDR é capaz de detectar os sinais de retorno de forma independente, sem efeitos de interferência cruzada, mesmo quando as regiões de detecção são consecutivas. O perfil um pouco mais ruidoso dos traços do OTDR é observado devido à redução do tempo de médias. No entanto, os processos de normalização realizados durante as etapas de processamento de dados minimizam esses efeitos na medição final da temperatura, resultando em um erro absoluto de medida inferior a 2°C.

A Figura 44 ilustra os níveis de intensidade anti-Stokes refletida na cabeça sensora II em relação à espessura do alumínio removido durante o processo de corrosão, para o caso apresentado na Figura 43. É possível observar que, quando o filme de alumínio ainda possui uma espessura significativa, não há alteração na intensidade relativa, apesar da corrosão estar ocorrendo. No entanto, à medida que o filme de alumínio se torna mais fino, dependendo da taxa de corrosão, ele pode ser rapidamente consumido, resultando em uma variação intensa e posteriormente retornando a um valor constante. Nessa figura, é possível observar uma redução de 12,5 dB no nível de intensidade da luz refletida, correspondendo a uma sensibilidade de 0,74 dB/nm na faixa sensível. O tempo total de corrosão do alumínio, ou seja, o tempo em que não foram identificadas variações na intensidade da luz refletida na região da cabeça sensora II, foi de 143 segundos (equivalente a 2,38 minutos). Com base nesses dados, pode-se calcular que a taxa de corrosão do alumínio é de aproximadamente 45,04 nm/min.

As discrepâncias entre a taxa esperada para a corrosão do alumínio pelos ácidos Al-etcher e Si Iso-Etch, mostrada nas Figuras X e Y, e as taxas medidas podem estar relacionadas a diversos fatores, incluindo a concentração e o nível de pureza de cada componente presente na solução ácida (OLIVEIRA et al., 2021; FREDJ et al., 2012). Variações na concentração dos componentes ácidos ou impurezas presentes podem afetar a reatividade do processo corrosivo e, conseqüentemente, resultar em taxas de corrosão diferentes das esperadas. No entanto, as taxas medidas pelo sensor multiparâmetro são consistentes com as taxas medidas pelo sensor de corrosão durante a caracterização das amostras de fibras metalizadas, apresentadas na Seção

Figura 44 – Intensidade anti-Stokes relativa refletida na cabeça do sensor II em função da espessura da camada de alumínio removida durante a corrosão por Si Iso-Etch .



Fonte: o autor, 2023.

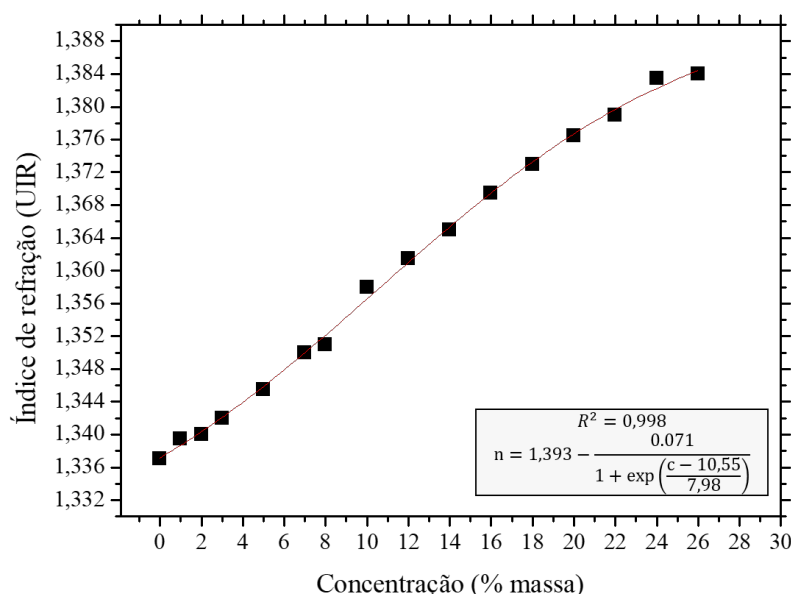
5.1.1.1.

Para medir o índice de refração, foi adotada a utilização uma solução líquida de referência, que possui um índice de refração de $n_0 = 1,3370$ UIR à temperatura ambiente ($25\text{ }^{\circ}\text{C}$). Inicialmente, a cabeça sensora I e o carretel de fibra de 24 m foram mergulhados em uma solução de referência, também à temperatura ambiente, com o intuito de obter um sinal de referência (I_0). Em seguida, esses componentes foram imersos em diferentes substâncias líquidas que apresentavam índices de refração variáveis. As variações nos índices de refração foram obtidas utilizando soluções de cloreto de sódio em água deionizada, com concentrações que variavam de 0% a 26% de NaCl. Os índices de refração da água deionizada e das soluções de NaCl foram medidos utilizando um refratômetro.

A Figura 45 mostra como índice de refração das soluções varia com a concentração de NaCl. Na figura, é possível perceber que o índice de refração aumenta conforme a concentração de NaCl aumenta. Isso significa que as soluções com concentrações mais elevadas de cloreto de sódio terão um índice de refração maior em comparação com as soluções menos concentradas. A linha sólida na Figura indica o ajuste dos pontos experimentais por uma função de Boltzmann. O coeficiente de determinação ($R^2 = 0,998$) indica que o ajuste é muito próximo aos valores de índice de refração medidos. Isso significa que a função de Boltzmann é capaz de modelar de forma precisa e adequada a relação entre a concentração de cloreto de sódio e o índice de refração, demonstrando uma alta correlação entre os dados experimentais e o ajuste teórico. Essa

alta precisão do ajuste reforça a confiabilidade dos resultados obtidos e a validade da função de Boltzmann como uma descrição adequada para esse comportamento. Ainda na Figura 45, a faixa de concentrações de NaCl abrange índices de refração entre 1,337 UIR, quando a concentração é de 0% de NaCl, e 1,3840 UIR, para a concentração de 26% de NaCl. É importante ressaltar que a concentração máxima de NaCl nas soluções é limitada pela saturação dessas soluções, e concentrações acima de 26% resultam na precipitação do sal de NaCl.

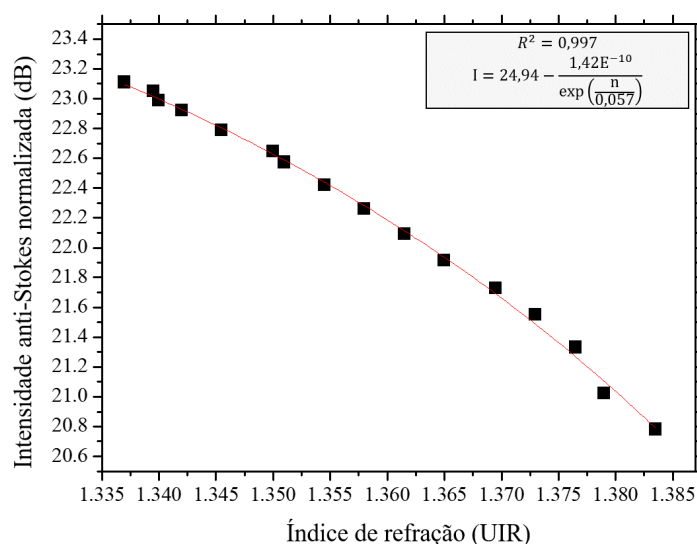
Figura 45 – Variação do índice de refração para diferentes concentrações de soluções de cloreto de sódio.



Fonte: o autor, 2023.

A Figura 46 apresenta a intensidade anti-Stokes, modulada pelas variações do índice de refração à temperatura ambiente. Essa intensidade foi obtida utilizando uma configuração experimental análoga àquela ilustrada na Figura 36, com exceção da remoção do cabeça sensora II. Observa-se na Figura 46 que a intensidade da luz anti-Stokes refletida diminui de forma contínua à medida que o índice de refração aumenta. Essa relação indica que, para soluções com concentrações mais elevadas de cloreto de sódio, onde os índices de refração são maiores, a intensidade da reflexão anti-Stokes Fresnel é menor. Esses resultados também evidenciando a viabilidade de medir os índices de refração em um sistema integrado de detecção distribuída de temperatura baseado em Raman. A Figura 46 indica também a sensibilidade do sensor em relação ao índice de refração, que é de $0,5 \text{ dB}/10^{-3} \text{ UIR}$. Além disso, a resolução do sensor é de $4,0 \cdot 10^{-3} \text{ UIR}$. Esses parâmetros indicam a capacidade do sensor de detectar e quantificar variações muito pequenas no índice de refração, ressaltando sua aplicabilidade para aplicações que requerem a detecção precisa de variações nos índices de refração.

Figura 46 – Intensidade anti-Stokes da reflexão de Fresnel na cabeça sensora I em função do índice de refração.



Fonte: o autor, 2023.

A caracterização do sistema sensor multiparâmetro para o monitoramento da temperatura é apresentada nas Figuras 47(a) e 47(b). Para isso, o carretel de 24 metros de fibra óptica foi submetido a uma faixa de temperaturas de 30 a 100 °C, enquanto a cabeça sensora I foi imersa em líquidos com diferentes índices de refração, e a cabeça sensora II foi mantida exposta ao ar ambiente, livre de corrosão.

A Figura 47(a) mostra os níveis de intensidade do sinal anti-Stokes retroespalhado em função da temperatura, mantendo as outras regiões do link sensor em temperatura ambiente (aproximadamente 25 °C, sem controle de temperatura), para soluções com diferentes índices de refração. Os resultados revelam que a intensidade óptica medida varia cerca de 1,7 dB à medida que a temperatura aumenta de 30 °C para 100 °C. Um ajuste linear também é mostrado na figura, com um coeficiente de determinação (R^2) de 0,992. O RMSE (raiz do erro quadrático médio) obtido é de 1,30 °C, e o erro máximo é de 2,55 °C a 55 °C. Portanto, é possível estimar uma resolução de temperatura de 2 °C e uma sensibilidade de 0,243 dB/°C.

A análise desses resultados também revela que os níveis de intensidade dos sinais anti-Stokes, que fornecem informações sobre a temperatura, são independentes do índice de refração do meio externo, monitorado pela cabeça sensora I. Assim, é possível concluir que a intensidade do sinal retroespalhado anti-Stokes detectado pelo OTDR não é influenciada pelas variações de reflexão de Fresnel no sensor I.

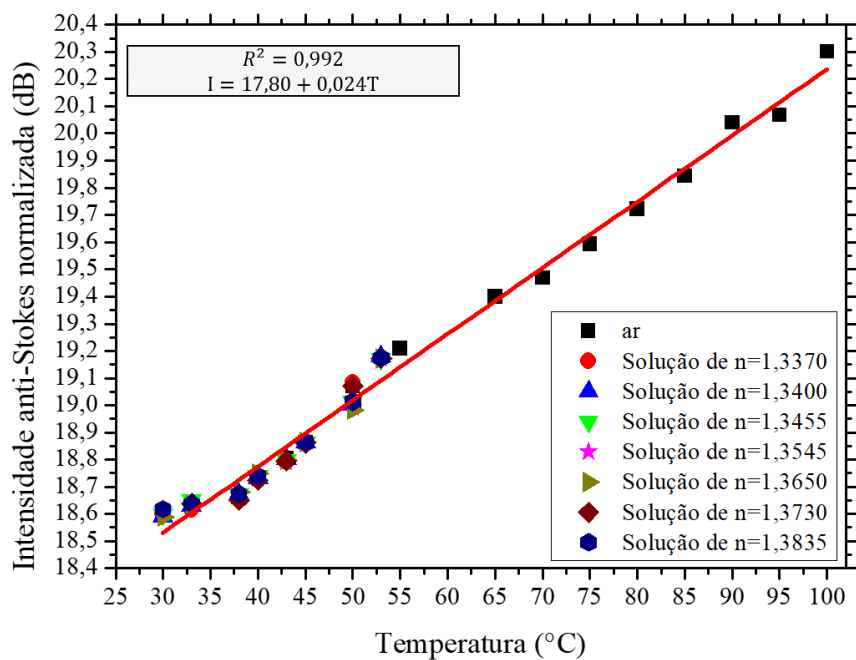
A diferença na faixa de temperatura entre as Figuras 47(a) e 47(b) deve-se à restrição imposta pela limitação da temperatura das amostras aquosas, a fim de evitar a evaporação e a alteração de sua concentração. Essa limitação é importante para garantir a precisão e a exatidão das medidas do índice de refração, contribuindo para a confiabilidade dos resultados obtidos.

Os resultados experimentais comprovam que o sistema SDT-R multiparâmetro tem uma boa correspondência entre os valores de temperatura obtidos para líquidos e ar, em comparação com as medições do termômetro. Isso é evidenciado pela alta linearidade observada na Figura 47-(b), indicando a consistência entre a detecção distribuída e o sensor eletrônico comercial em diferentes meios (gasoso e aquoso). O ajuste linear realizado na faixa de temperatura avaliada resultou em um coeficiente de determinação (R^2) de 0,99, demonstrando uma forte relação entre as leituras do DTS-R e do termômetro. Além disso, o desvio máximo de temperatura foi inferior a 2 °C, o qual pode ser atribuído a flutuações de temperatura e a efeitos não compensados que podem ocorrer no sistema.

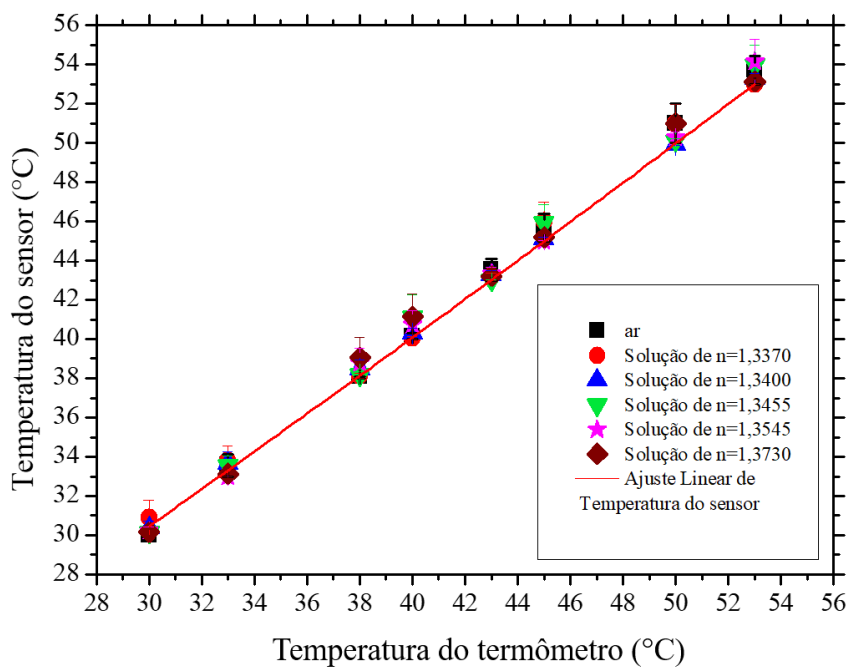
Como o índice de refração é uma função da temperatura, foram realizados testes experimentais para avaliar o sensor quando as temperaturas da substância sob teste são alteradas. Nesses testes, a temperatura da substância em análise foi ajustada para promover variações no índice de refração. Esse procedimento envolveu a imersão da cabeça sensora I e do carretel de fibra de 24 m em uma solução de cloreto de sódio, enquanto a temperatura foi gradualmente aumentada de 30 °C a 53 °C. O carretel de fibra óptica, quando submerso no líquido, desempenhou o papel de um transdutor de temperatura, enquanto a cabeça sensora I detectou as mudanças na intensidade da reflexão de Fresnel decorrentes do aumento da temperatura do líquido. Esses efeitos são observados na Fig. 48(a), onde há picos de intensidade do sinal anti-Stokes na região de detecção para solução de NaCl a 10% ($n = 1,3545$ UIR à temperatura ambiente), quando aquecida a 53 °C. Os resultados obtidos demonstram claramente como a intensidade da luz refletida na região do sensor I é afetada pelas variações de temperatura, para a mesma amostra de líquido. Além disso, essas variações de temperatura do líquido são registradas pelo sensor, sendo possível acompanhá-las por meio do platô. O platô corresponde à parte do link do sensor, que é o carretel de fibra óptica de 24 metros, imerso no líquido em teste e sujeito a essas variações de temperatura.

A Figura 6(b) apresenta a relação entre a intensidade da luz Raman anti-Stokes refletida cabeça sensora I e a temperatura do líquido. Nesse caso, observa-se que a intensidade da luz anti-Stokes refletida no sensor I varia monotonamente devido às alterações no índice de refração causadas exclusivamente pelo aumento da temperatura. Isso significa que não ocorrem mudanças abruptas na intensidade da luz refletida na cabeça sensora I quando a temperatura do líquido é modificada. Além disso, os níveis de intensidade anti-Stokes para o carretel de fibra óptica submerso no líquido não são afetados pela luz refletida no sensor I, o que permite a detecção precisa da temperatura ao longo do link do sensor, sem a ocorrência de interferência cruzada entre as medições. Dessa forma, é possível obter medidas confiáveis e independentes, sem que os

Figura 47 – (a) Intensidade do sinal anti-Stokes Raman retroespalhado em função da temperatura e (b) correlação entre as temperaturas medidas pelo SDT-R multiparâmetro e por termômetro para o carretel de fibra imerso em solução de cloreto de sódio de diferentes concentrações e no ar.



(a)

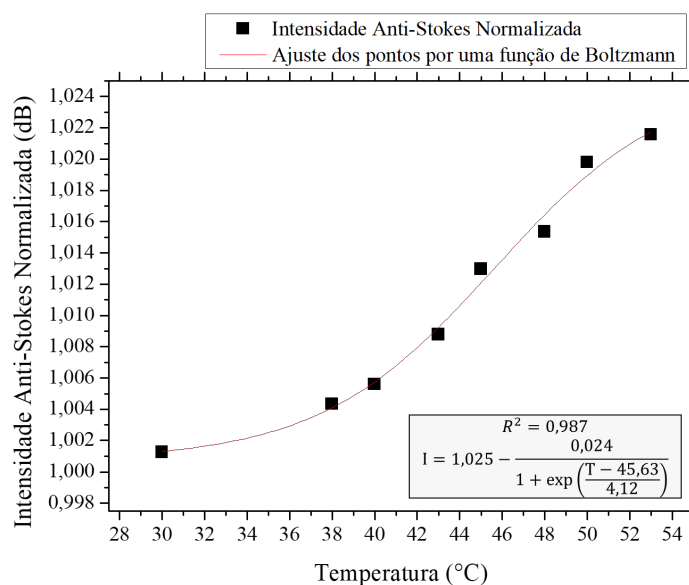
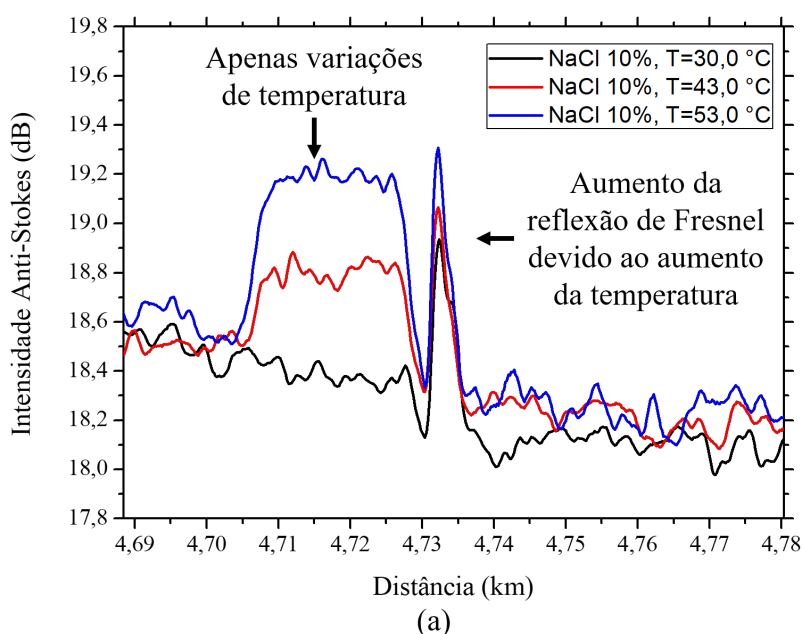


(b)

Fonte: o autor, 2023.

efeitos que ocorrem na cabeça sensora I afetem os resultados nas demais regiões do link sensor.

Figura 48 – (a)) Intensidade Anti-Stokes Raman na região de monitoramento para a solução com $n = 1,3545$ UIR para diferentes temperaturas (30 °C – 53 °C); (b) intensidade anti-Stokes da reflexão de Fresnel na cabeça sensora I em função da temperatura do líquido.



(b)

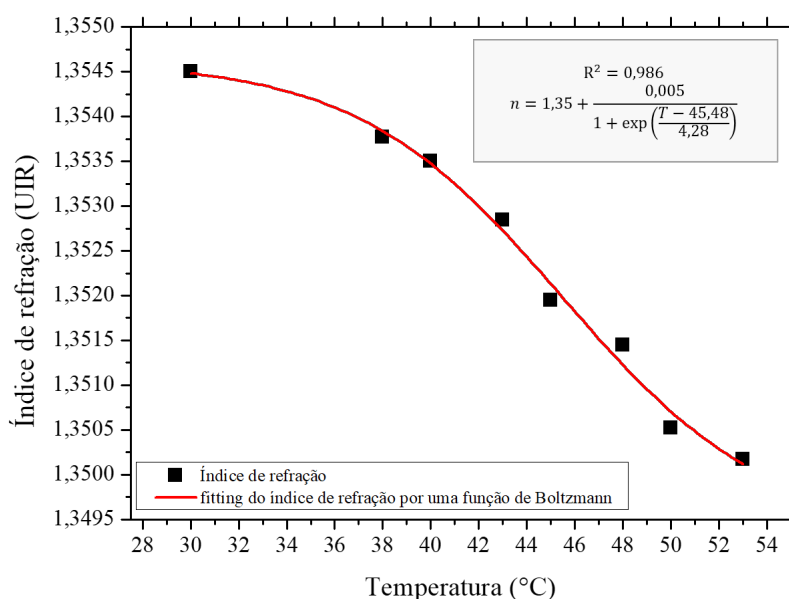
Fonte: o autor, 2023.

A equação de Fresnel (Equação 25) é aplicada para determinar o índice de refração de diferentes substâncias com base nos níveis de intensidade da luz refletida na interface entre a fibra óptica e o líquido (WANG et al., 2018). No caso específico da luz anti-Stokes em sistemas

Raman-OTDR, utiliza-se a razão entre as intensidades medidas e um valor de referência com um índice de refração conhecido para obter uma medida direta do índice de refração do líquido, utilizando a Equação 27 apresentada na Seção 2.5 do Capítulo 2.

Os índices de refração obtidos para uma solução de NaCl a 10%, em função da temperatura do líquido, são mostrados na Figura 49. Esses valores foram obtidos por meio da Equação 2.5. O índice de refração efetivo do núcleo da fibra óptica é $n_f = 1,4682$ UIR. Este parâmetro foi obtido via OTDR. Os pontos indicam que o índice de refração da solução diminui monotonamente com o aumento da temperatura. A Figura 49 também mostra como os pontos experimentais se ajustam a uma função de Boltzmann, com um coeficiente de determinação $R^2 = 0,986$. Esse valor indica que os dados experimentais e o ajuste realizado têm alto grau de associação. Dessa forma, ao medir a temperatura do líquido, é possível obter diretamente o índice de refração da solução de teste para qualquer temperatura na faixa, por meio da função estabelecida.

Figura 49 – Variação do índice de refração da solução de cloreto de sódio a 10% em função da temperatura do líquido.



Fonte: o autor, 2023.

Além disso, esses resultados revelam que o índice de refração do líquido contendo 10% de NaCl apresenta uma variação de aproximadamente 0,0043 UIR dentro da faixa de temperatura de 30 °C a 53 °C, correspondendo a uma taxa de variação de aproximadamente 0,00019 UIR/°C. Esses valores estão em estreita concordância com os resultados encontrados na literatura (WANG et al., 2018), o que confirma a consistência e a confiabilidade do método utilizado.

A Tabela 4 apresenta os índices de refração medidos para soluções de NaCl com

diferentes concentrações na faixa de temperatura de 30°C a 53°C, juntamente com o erro absoluto máximo (E_{mx}) da medida obtida pelo sensor para cada concentração. O erro absoluto máximo é de 0,00034 UIR para a medida de índice de refração igual a 1,3617, correspondente à solução de 22% de NaCl a 45°C. Na Figura 50, é mostrada a relação entre o índice de refração e as temperaturas obtidas pelo sensor. Observa-se que, para todas as dez concentrações, não há mudanças abruptas nos valores do índice de refração. É interessante notar que a única convergência nos valores de índice de refração ocorre para as soluções de 1% e 2% de NaCl, quando a temperatura da amostra é de 50 °C e 53 °C. Essa ambiguidade ou convergência pode ocorrer devido a diversos fatores, incluindo imprecisões na concentração, que são relativamente próximas, e flutuações dos sinais detectados.

Tabela 4 – Valores experimentais dos índices de refração para soluções com diferentes concentrações de NaCl e temperaturas entre 30 °C e 53°C.

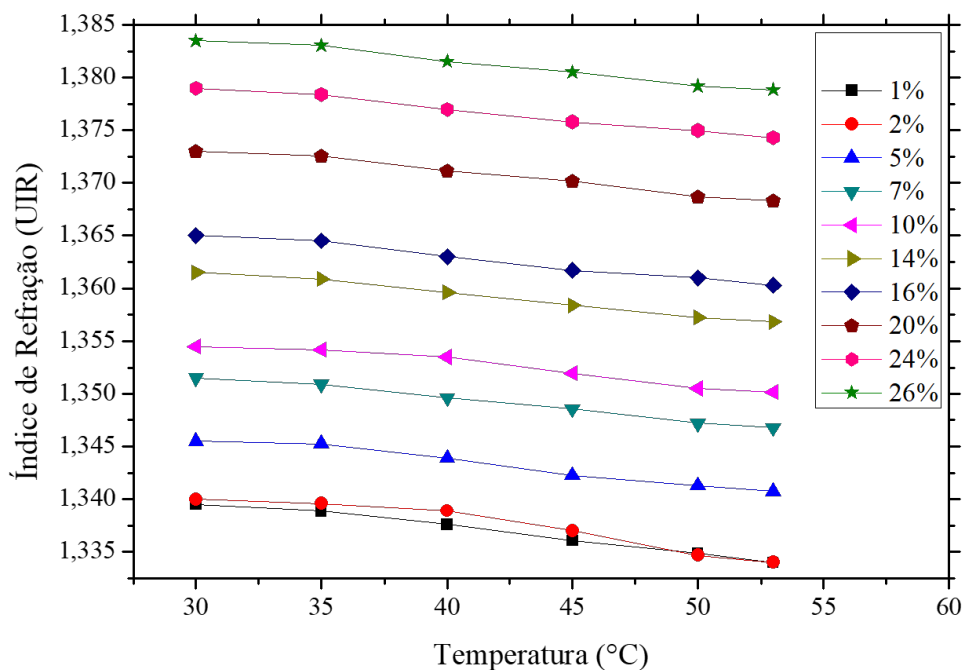
Concentração	Temperatura						$E_{mx}.$ (UIR).
	30 °C	35 °C	40 °C	45 °C	50 °C	53 °C	
0,01	1,3395	1,3388	1,3377	1,3362	1,3347	1,3339	$1,4 \times 10^{-4}$
0,02	1,3400	1,3397	1,3388	1,3369	1,3348	1,3340	$1,0 \times 10^{-4}$
0,05	1,3455	1,3451	1,3439	1,3422	1,3411	1,3409	$1,2 \times 10^{-4}$
0,07	1,3515	1,3508	1,3497	1,3484	1,3472	1,3467	$1,3 \times 10^{-4}$
0,10	1,3545	1,3542	1,3542	1,3534	1,3507	1,35012	$1,8 \times 10^{-4}$
0,14	1,3615	1,3608	1,3596	1,3583	1,3572	1,3568	$6,4 \times 10^{-5}$
0,16	1,3650	1,3643	1,3630	1,3617	1,3608	1,36045	$2,2 \times 10^{-4}$
0,20	1,3730	1,3724	1,3713	1,3698	1,3687	1,3682	$2,1 \times 10^{-4}$
0,24	1,3790	1,3782	1,3770	1,3758	1,3748	1,3744	$3,4 \times 10^{-4}$
0,26	1,3835	1,3829	1,3817	1,3803	1,3792	1,3788	$2,1 \times 10^{-4}$

Fonte: o autor, 2023.

Teoricamente, a razão entre as intensidades das reflexões de Fresnel da luz anti-Stokes e Stokes pode ser utilizada para determinar o índice de refração de líquidos (WANG et al., 2019). No entanto, ao empregar o efeito Raman em fibras ópticas, a utilização exclusiva do sinal anti-Stokes para essa finalidade apresenta uma vantagem significativa. Isso decorre da diferença de atenuação na janela de comprimento de onda desses sinais, o que demanda a utilização de métodos adicionais para correção desses efeitos. Além disso, a diferença no caminho óptico causada pelos diferentes comprimentos de onda pode resultar em variações na localização dos pontos de reflexão de Fresnel, o que pode afetar a precisão da medida (WANG et al., 2018). Portanto, a utilização do sinal anti-Stokes no sistema de detecção multiparâmetro mostra-se benéfica, proporcionando uma abordagem mais simplificada e potencialmente precisa para a determinação do índice de refração em sistemas SDT-R.

O sistema de sensores multiparâmetros proposto também foi submetido a uma avaliação para a medição simultânea de temperatura, variações do índice de refração e corrosão. A Figura 51 apresenta os traços OTDR para porção testada do enlace do sensor, que possui aproximadamente

Figura 50 – Variação do índice de refração em função da temperatura para soluções de NaCl com diversas concentrações.

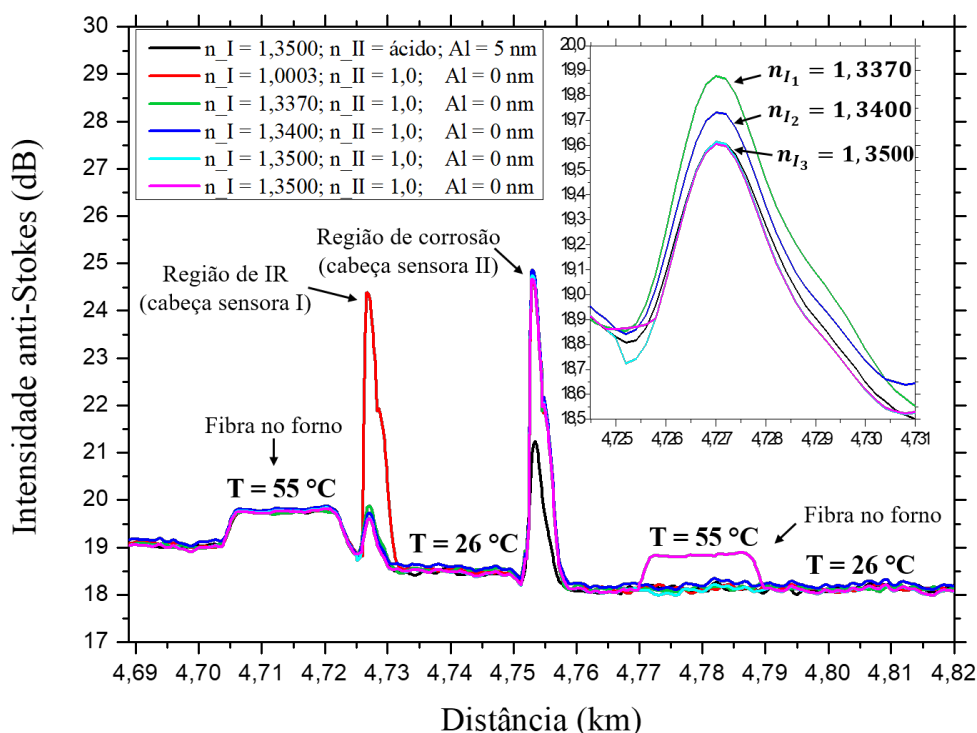


Fonte: o autor, 2023.

130 metros de extensão, usando a configuração experimental da Figura 36. Nesse experimento, o sensor de índice de refração (cabeça sensora I) foi exposto a variações controladas do índice de refração por meio de diferentes concentrações de soluções de cloreto de sódio, mantidas à temperatura ambiente. Simultaneamente, o sensor de corrosão (cabeça sensora II) foi imerso em ácido para monitorar a corrosão de uma camada de alumínio com espessura de 100 nm. Uma seção inicial de fibra óptica, com 24 metros de comprimento e localizada imediatamente antes da cabeça sensora I, foi mantida a uma temperatura constante de 55 °C. Durante todo o experimento, a cabeça sensora I permaneceu imersa em uma solução de NaCl com concentração de 7% ($n = 1,3500$ UIR), tanto durante o processo de corrosão na cabeça sensora II quanto após sua conclusão. Após a finalização da corrosão do alumínio, a cabeça sensora II foi exposta ao ar ambiente, e uma segunda região do enlace do sensor, com 24 metros de comprimento e localizada imediatamente após a cabeça sensora II, foi aquecida a uma temperatura de 55 °C, mantendo-se os demais parâmetros do sistema.

Na Figura 51, é possível observar as variações nos níveis de potência óptica refletida devido a mudanças no índice de refração na cabeça I (variando de 1,0003 a 1,3500 UIR) e à corrosão do alumínio na cabeça II (com espessuras de Al de 0 nm e 5 nm) em ácido Al-etcher. Além disso, é notável que os níveis de intensidade da reflexão de Fresnel na cabeça sensora I, para

Figura 51 – Picos de intensidade dos sinais anti-Stokes Raman na cabeça sensora I, para diferentes índices de refração, e na cabeça sensora II, durante e após a corrosão do alumínio de 100 nm em ácido Al-etcher, e duas regiões com 24 metros da fibra mantida dentro do forno, enquanto o restante está a 26 °C.



Fonte: o autor, 2023.

um índice de refração de 1,3500 UIR, permanecem inalterados, independentemente de variações de temperatura ou corrosão em outras partes do sistema. A Figura 51 também mostra que as variações na intensidade do sinal Raman anti-Stokes, resultantes do aumento da temperatura em duas regiões distintas do sistema, antes e depois das cabeças sensoras I e II, são consistentes. Isso confirma que o sistema OTDR amplificado por EDFA possibilita o monitoramento preciso e confiável da temperatura ao longo do link do sensor, sem interferir nas medições do índice de refração ou corrosão, e sem ser afetado por esses efeitos.

O sistema pode ser adaptado para adicionar novos elementos sensores e monitorar a corrosão em todo o link do sensor, especialmente para aplicações de longa distância (27 km), conforme proposto por (MARTINS-FILHO et al., 2007; NASCIMENTO et al., 2012). Da mesma forma, o sistema pode ser ajustado para realizar o monitoramento multiponto do índice de refração. Além disso, as cabeças sensoras podem ser implantadas em pares para obter os dois parâmetros no mesmo ponto, embora necessitem estar em comprimentos de fibra diferentes no link para permitir a demultiplexação da reflectometria no domínio do tempo. O número máximo

de cabeças sensoras é determinado por diversos fatores, como a faixa dinâmica do equipamento OTDR, o ganho do EDFA, e as perdas totais do link, incluindo a atenuação na fibra e perdas de inserção por dispositivos de fibra, como circuladores, divisores e filtros.

5.3 CONCLUSÕES

Este capítulo apresentou os resultados experimentais de um sensor multiparâmetro de fibra óptica, baseado em reflectometria Raman anti-Stokes no domínio do tempo. Esse sensor, proposto e demonstrado experimentalmente pela primeira vez, é capaz de monitorar simultaneamente temperatura, corrosão e índice de refração. O sistema sensor foi configurado para adicionar duas cabeças sensoras distintas, uma dedicada ao monitoramento da corrosão e outra destinada à medição do índice de refração, a um sistema distribuído de detecção de temperatura baseado em Raman (SDT-R), implementado usando um equipamento comercial de reflectometria óptica no domínio do tempo (OTDR), combinado com um amplificador padrão de fibra dopada com érbio (EDFA).

No sistema sensor, os pulsos OTDR são amplificados por EDFA e geram sinais anti-Stokes retroespalhados e refletidos, que são filtrados opticamente e enviados de volta ao equipamento OTDR para detecção. A cabeça sensora I é usada para medir o índice de refração e consiste em uma fibra óptica monomodo com extremidade clivada. Soluções de NaCl de diferentes concentrações e temperaturas foram utilizadas nos experimentos para promover variações no índice de refração, que causam alterações na reflexão de Fresnel da luz Raman anti-Stokes detectada pelo OTDR.

Para o monitoramento da corrosão, uma cabeça sensora foi implementada utilizando uma fibra óptica com extremidade clivada e revestida por um filme fino de alumínio. A deposição do metal foi realizada por Sputtering. O monitoramento da corrosão foi realizado em ambiente de laboratório através de um processo controlado, fazendo use de ácidos apropriados para a corrosão do alumínio. Nesse processo, à medida que o alumínio é corroído, a intensidade da luz refletida detectada pelo OTDR diminui, possibilitando a obtenção da taxa de corrosão.

O sensor de fibra multiparâmetro foi submetido a avaliação em soluções caracterizadas por índices de refração variando na faixa de 1,3370 a 1,3840 UIR, com temperaturas abrangendo o intervalo de 30 a 100°C, e em presença de corrosão de 100 nm de alumínio. Os resultados experimentais revelam que, por meio da análise da distribuição espacial das intensidades dos sinais de retorno Raman anti-Stokes, modulados por diferentes parâmetros, é viável efetuar o monitoramento simultâneo e independente da corrosão, índice de refração e temperatura, ao longo de múltiplos pontos na fibra, mediante o uso do equipamento OTDR. A sensibilidade do sensor se mostrou consistente com os valores reportados na literatura para a detecção de variações nos parâmetros monitorados, com taxas de corrosão e resolução de temperatura especificadas.

Em síntese, os resultados obtidos corroboram a viabilidade e eficácia do sensor de fibra

multiparâmetro proposto, e reforçam o potencial desse sistema para aplicações em diferentes áreas, destacando sua relevância no monitoramento de diversas variáveis em tempo real.

6 CONCLUSÃO E PERSPECTIVAS FUTURAS

Esta Tese de Doutorado propõe e demonstra experimentalmente um novo sensor multiparâmetro baseado em reflectometria Raman anti-Stokes no domínio do tempo. O sensor proposto é capaz de realizar monitoramento simultâneo de temperatura, corrosão e índice de refração ao longo de um link de fibra óptica. Essa abordagem adiciona novas funcionalidades aos sistemas tradicionais de detecção distribuída de temperatura baseados em Raman (SDT-R), e expande as possibilidades de aplicação desses sistemas.

Inicialmente, são apresentados os resultados experimentais de um sistema de detecção distribuída baseado em Espalhamento Raman, implementado para monitorar a temperatura. O sistema utiliza um equipamento comercial de reflectometria óptica no domínio do tempo (OTDR) e amplificação através de fibra dopada com Érbio (EDFA). O desempenho do sensor foi avaliado experimentalmente em uma ampla faixa de temperatura, submetendo o link sensor a aquecimento de até 400 °C e resfriamento de até -196,15 °C. Além disso, foram realizadas análises da integridade do link do sensor de fibra em altas temperaturas e temperaturas criogênicas, bem como o uso de fibras especiais. Uma avaliação foi feita utilizando uma fibra óptica monomodo revestida por uma camada de alumínio de 13 μm de espessura, para operação em altas temperaturas. O sensor foi completamente caracterizado para um link sensor de até 27 Km de fibra óptica monomodo (padrão de telecomunicação), variando a largura temporal dos pulsos - OTDR amplificados. Foram determinadas as figuras de mérito do sistema, como faixa de operação de temperatura, resolução de temperatura, resolução espacial, alcance e tempo de medição.

Em seguida, são apresentados os resultados experimentais do sensor de fibra multiparâmetro baseado em reflectometria Raman anti-Stokes no domínio do tempo, com a capacidade de monitorar simultaneamente temperatura, corrosão e índice de refração. O sensor consiste de um sistema multiplexado que adiciona cabeças sensoras, para o monitoramento da corrosão e do índice de refração, ao sistema convencional de detecção distribuída de temperatura baseado em Raman (SDT-R) desenvolvido.

A cabeça sensora que monitora o índice de refração foi construída utilizando uma fibra óptica de extremidade cliva. Os testes experimentais foram conduzidos utilizando soluções de cloreto de sódio (NaCl), de diferentes concentrações e temperaturas distintas, para induzir termicamente variações no índice de refração. Essas variações resultam em modificações na reflexão de Fresnel da luz Raman anti-Stokes, que é detectada pelo OTDR. A cabeça sensora utilizada para monitorar a corrosão consiste de uma fibra óptica com extremidade clivada

e revestida por um filme fino de alumínio com 100 nm de espessura. Para as medições de laboratório, a corrosão foi simulada através de um processo acelerado e controlado utilizando ácidos. Nesse processo, à medida que o alumínio é corroído, a intensidade da luz refletida detectada pelo OTDR diminui, permitindo a obtenção da taxa de corrosão.

O desempenho do sensor multiparâmetro foi avaliado por meio de testes experimentais para soluções com índices de refração na faixa de 1,3370 - 1,3840 RIU, temperatura entre 30 e 100 °C e corrosão de 100 nm de alumínio. Durante os testes, foram analisadas a precisão, a sensibilidade e a capacidade de monitoramento simultâneo dos três parâmetros. Os resultados experimentais demonstraram que, por meio da análise da distribuição espacial das intensidades dos sinais refletométricos Raman anti-Stokes, modulados por diferentes parâmetros, é possível monitorar simultaneamente e de forma independente a corrosão, o índice de refração e a temperatura ao longo de múltiplos pontos. O sensor apresentou uma sensibilidade de 0,5 dB/10⁻³ UIR para variações do índice de refração de soluções contendo 10% de NaCl. Em relação à corrosão por Al-Etch, o sensor demonstrou uma sensibilidade de 0,43 dB/nm dentro da faixa de operação sensível. Quanto à temperatura, o sensor exibiu uma sensibilidade de 0,243 dB/°C, com uma resolução de 2 °C.

O sensor proposto aprimora o tradicional SDT-R ao acrescentar novas funcionalidades, além de apresentar um design compacto e leve em comparação com outros sensores não ópticos. Ademais, possui capacidade de operar remotamente em longas distâncias, constituindo um sistema de fabricação econômica e de fácil implementação. Essas características atribuem ao sensor um amplo potencial de aplicação em diversos setores, com destaque para as indústrias de óleo e gás.

6.1 CONTRIBUIÇÕES DA TESE DE DOUTORADO

Esta Tese contribui com os seguintes aspectos:

- Desenvolvimento de um novo sensor multiparâmetro: é proposto e demonstrado experimentalmente um inovador sensor multiparâmetro baseado em reflectometria Raman anti-Stokes no domínio do tempo. Essa contribuição representa um avanço significativo na área de sensores ópticos, permitindo o monitoramento simultâneo de temperatura, corrosão e índice de refração ao longo de um link de fibra óptica. A detecção multiparamétrica muitas vezes se mostra essencial para adquirir informações abrangentes sobre o estado e desempenho de um sistema. Essa abordagem pioneira expande as capacidades de sensores ópticos existentes e oferece uma solução eficiente para diversas aplicações.
- Expansão das funcionalidades dos sistemas de detecção distribuída de temperatura: o sensor proposto adiciona novas funcionalidades aos sistemas tradicionais de detecção distribuída de temperatura baseados em Raman. Isso amplia as possibilidades de aplicação

desses sistemas, tornando-os mais versáteis e capazes de fornecer informações adicionais, como a corrosão e o índice de refração.

- Caracterização e avaliação do desempenho do sensor: é realizada uma ampla caracterização do desempenho do sensor, incluindo testes experimentais em diferentes condições. Isso envolve a avaliação da faixa de operação de temperatura, resolução de temperatura, resolução espacial, alcance e tempo de medição do sensor. Essa contribuição fornece uma compreensão abrangente das capacidades e limitações do sensor proposto.
- Aprimoramento das funcionalidades: foram realizados diversos testes com o objetivo de avaliar sua operação em relação a diferentes parâmetros. Um dos aspectos abordados foi a ampla faixa de temperatura na qual o sensor foi avaliado. O sistema foi testado desde temperaturas criogênicas, chegando a $-196,15\text{ }^{\circ}\text{C}$, até temperaturas elevadas de até $400\text{ }^{\circ}\text{C}$, abrangendo uma faixa de operação de aproximadamente $600\text{ }^{\circ}\text{C}$. Além disso, foram exploradas opções de utilização de fibra óptica especialmente projetada para operar em altas temperaturas, visando melhorar o desempenho e a durabilidade do sensor nessas condições extremas. Também foram realizadas análises para avaliar possíveis danos ao link do sensor. Essas melhorias e investigações contribuíram para ampliar as capacidades do sensor e garantir sua operação eficaz em uma ampla gama de condições de temperatura.
- Potencial de aplicação em diversos setores: o sensor proposto apresenta um amplo potencial de aplicação em diversos setores, com destaque para as indústrias de óleo e gás. Além de fornecer informações sobre temperatura, o sensor é capaz de monitorar corrosão e índice de refração, o que pode ser extremamente relevante para aplicações nesses setores, especialmente pelo fato de que a natureza entre essas grandezas está interliga, tornando essencial a detecção multiparamétrica. A contribuição dessa tese está na possibilidade de melhorar o monitoramento e a manutenção de infraestruturas críticas nesses setores.
- Revisão da literatura sobre sensores de temperatura: é realizada uma revisão da literatura sobre sensores distribuídos de temperatura baseados em Espalhamento Raman em fibras ópticas. A revisão abrange uma variedade de estruturas sensoras e discute as melhorias realizadas para aprimorar o desempenho desses sistemas. Além disso, são realizadas análises qualitativas dos sensores revisados, considerando a faixa de operação, sensibilidade e resolução dos mesmos.
- Revisão da literatura sobre sensores de corrosão: é realizada uma revisão da literatura sobre sensores ópticos de corrosão. A revisão aborda as principais estruturas e técnicas utilizadas para monitorar processos corrosivos por meio de fibras ópticas. Além disso, é realizada uma análise qualitativa dos sensores de corrosão revisados, levando em consideração parâmetros como o perfil do elemento sensor e a obtenção da taxa de corrosão.
- Revisão da literaturas sobre sensores multipâmetros: é realizada uma revisão abrangente da literatura sobre sensores multiparâmetros. São apresentadas diversas estruturas de

elementos sensores, de acordo com os princípios de funcionamento e as combinações de parâmetros que podem ser medidos simultaneamente. A revisão também aborda os princípios de operação desses sensores e sua aplicabilidade em diferentes áreas.

6.2 PROPOSTA PARA TRABALHOS FUTUROS

Como continuação desta Tese de Doutorado, são listadas as seguintes propostas:

- Testar e avaliar a utilização de fibras especiais, adequadas para suportar altas temperaturas, tais como fibras revestidas de cobre, polímeros termoplásticos e outros, com o objetivo de desenvolver um sensor distribuído capaz de operar em temperaturas superiores a 400 °C, com a avaliação da máxima temperatura alcançável.
- Explorada a utilização de técnicas e equipamentos adicionais com o intuito de aprimorar a resolução espacial e de temperatura, alcance, precisão e sensibilidade dos sensores multiparâmetros.
- Investigar e caracterizar a operação dos sensores multiparâmetros para a utilização de outras estruturas para medir o índice de refração em líquidos, como as fibras ópticas de perfil D e heteronúcleo.
- Investigar e caracterizar operação do sensor multiparâmetro para a utilização de outras estruturas como elementos transdutores para o monitoramento da corrosão, explorando opções como fibras ópticas de perfil D metalizado e fibras ópticas metalizadas de bicamada.
- Testar e avaliar o sensor de índice de refração para operação em ambientes de alta temperatura, com o objetivo de analisar o desempenho do sensor nessas condições para verificar a capacidade de suportar e operar adequadamente em condições de temperatura elevada.
- Testar e avaliar o sensor multiparâmetro em relação à corrosão em diferentes temperaturas, levando em consideração que a taxa de corrosão é afetada pela temperatura, para entender como o sensor se comporta e fornece medidas em condições térmicas variadas.
- Realizar um estudo para analisar os danos provocados nos elementos sensores de corrosão e índice de refração quando exposto a altas temperaturas, acima de 200 °C, levaremos em consideração que as altas temperaturas podem catalizar o processo de corrosão do metal.
- Automatizar e otimizar o processo de coleta e processamento de dados, para melhorar a eficiência e a precisão desses processos, tornando-os mais rápidos e simplificados.

REFERÊNCIAS

- AASHIA, R.; ASOKAN, S. Simultaneous measurement of strain and temperature using type i and pre-strained fiber bragg gratings. In: IEEE. *SENSORS, 2009 IEEE*. [S.l.], 2009. p. 1229–1231. Citado na página 75.
- ABDERRAHMANE, S. et al. An optical fibre corrosion sensor with an electroless deposit of ni-p. *Sensors and Actuators B: Chemical*, Elsevier, v. 75, n. 1-2, p. 1–4, 2001. Citado na página 66.
- AGRAWAL, G. *Applications of nonlinear fiber optics*. [S.l.]: Academic press, 2001. Citado na página 27.
- AGRAWAL, G. P. Nonlinear fiber optics. In: *Nonlinear Science at the Dawn of the 21st Century*. [S.l.]: Springer, 2000. p. 195–211. Citado na página 28.
- AGRAWAL, G. P. *Fiber-optic communication systems*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2012. v. 222. Citado 2 vezes nas páginas 28 e 30.
- AHMED, F. et al. Bragg grating embedded in mach-zehnder interferometer for refractive index and temperature sensing. *IEEE Photonics Technology Letters*, IEEE, v. 28, n. 18, p. 1968–1971, 2016. Citado na página 85.
- AISYAH, P. Y.; HATTA, A. M.; PRATAMA, D. Y. Design of sms (single mode-multi mode coreless-single mode) optical fiber as corrosion sensor. In: INTERNATIONAL SOCIETY FOR OPTICS AND PHOTONICS. *Second International Seminar on Photonics, Optics, and Its Applications (ISPhOA 2016)*. [S.l.], 2016. v. 10150, p. 101500Q. Citado na página 70.
- ALAHBABI, M.; CHO, Y.; NEWSON, T. P. Simultaneous distributed measurements of temperature and strain using spontaneous raman and brillouin scattering. In: INTERNATIONAL SOCIETY FOR OPTICS AND PHOTONICS. *Second European Workshop on Optical Fibre Sensors*. [S.l.], 2004. v. 5502, p. 488–491. Citado na página 77.
- ALBERTO, N. J. et al. Simultaneous temperature and refractive index sensor based on a tilted fibre bragg grating. In: SPIE. *International Conference on Applications of Optics and Photonics*. [S.l.], 2011. v. 8001, p. 576–582. Citado na página 84.
- ALMUBAIED, O. et al. Monitoring corrosion process of reinforced concrete structure using fbg strain sensor. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, IEEE, v. 66, n. 8, p. 2148–2155, 2017. Citado na página 70.
- ALVES, H. P. et al. Processo de fabricação de fibra Óptica perfil d para aplicações dem sensores Ópticos. In: *MOMAG 2018-18º SBMO-Simpósio Brasileiro de Micro-ondas e Optoeletrônica e o 13º CBMag-Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo*. [S.l.: s.n.], 2018. Citado 2 vezes nas páginas 115 e 116.

ALWIS, L.; SUN, T.; GRATTAN, K. T. Temperature-compensated optimized relative humidity and refractive index sensors using a hybrid fibre grating configuration. In: IEEE. *2015 IEEE SENSORS*. [S.l.], 2015. p. 1–2. Citado na página 78.

AMIRA, Z.; MOHAMED, B.; TAHAR, E. Monitoring of temperature in distributed optical sensor: Raman and brillouin spectrum. *Optik*, Elsevier, v. 127, n. 8, p. 4162–4166, 2016. Citado na página 77.

ARREGUI, F. J. et al. Simultaneous measurement of humidity and temperature by combining a reflective intensity-based optical fiber sensor and a fiber bragg grating. *IEEE Sensors Journal*, IEEE, v. 2, n. 5, p. 482–487, 2002. Citado 2 vezes nas páginas 78 e 79.

BAE, H. et al. Hybrid miniature fabry–perot sensor with dual optical cavities for simultaneous pressure and temperature measurements. *Journal of Lightwave Technology*, IEEE, v. 32, n. 8, p. 1585–1593, 2014. Citado na página 80.

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 3 vezes nas páginas 41, 48 e 49.

BAO, X.; ZHOU, Z.; WANG, Y. distributed time-domain sensors based on brillouin scattering and fwm enhanced sbs for temperature, strain and acoustic wave detection. *Photonix*, Springer, v. 2, p. 1–29, 2021. Citado 2 vezes nas páginas 29 e 75.

BAPTISTA, J. M. et al. High birefringence d-type fiber loop mirror used as refractometer. 2008. Citado na página 79.

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 55.

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 3 vezes nas páginas 39, 40 e 56.

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 4 vezes nas páginas 8, 36, 56 e 57.

BENNETT, K. D.; MCLAUGHLIN, L. Monitoring of corrosion in steel structures using optical fiber sensors. In: INTERNATIONAL SOCIETY FOR OPTICS AND PHOTONICS. *Smart Structures and Materials 1995: Smart Systems for Bridges, Structures, and Highways*. [S.l.], 1995. v. 2446, p. 48–59. Citado 3 vezes nas páginas 9, 22 e 65.

BERRETTONI, C. et al. Fibre tip sensor with embedded fbg-lpg for temperature and refractive index determination by means of the simple measurement of the fbg characteristics. *Journal of sensors*, Hindawi, v. 2015, 2015. Citado 2 vezes nas páginas 84 e 85.

BIAN, J. et al. A polarization maintaining fiber sensor for simultaneous measurement of temperature and strain. *Optik*, Elsevier, v. 127, n. 20, p. 10090–10095, 2016. Citado 2 vezes nas páginas 75 e 83.

BOCK, W. J.; EFTIMOV, T. A. Simultaneous hydrostatic pressure and temperature measurement employing an lp/sub 01/-lp/sub 11/fiber-optic polarization-sensitive intermodal interferometer. *Ieee transactions on instrumentation and measurement*, IEEE, v. 43, n. 2, p. 337–340, 1994. Citado na página 83.

BOLOGNINI, G.; HARTOG, A. Raman-based fibre sensors: Trends and applications. *Optical Fiber Technology*, Elsevier, v. 19, n. 6, p. 678–688, 2013. Citado 16 vezes nas páginas 19, 20, 32, 33, 34, 35, 38, 39, 40, 47, 49, 54, 93, 96, 98 e 106.

BOLOGNINI, G. et al. Performance enhancement of raman-based distributed temperature sensors using simplex codes. In: OPTICAL SOCIETY OF AMERICA. *Optical Fiber Communication Conference*. [S.l.], 2006. p. OTuL1. Citado 2 vezes nas páginas 23 e 55.

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 4 vezes nas páginas 8, 53, 54 e 55.

BREMER, K. et al. Pressure, temperature and refractive index determination of fluids using a single fibre optic point sensor. *Sensors and Actuators A: Physical*, Elsevier, v. 256, p. 84–88, 2017. Citado na página 86.

BROWN, G. A.; HARTOG, A. Optical fiber sensors in upstream oil & gas. *Journal of petroleum technology*, SPE, v. 54, n. 11, p. 63–65, 2002. Citado na página 22.

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 2 vezes nas páginas 75 e 77.

CARPENTER, C. Distributed acoustic sensing for downhole production and injection profiling. *Journal of Petroleum Technology*, OnePetro, v. 68, n. 03, p. 78–79, 2016. Citado na página 50.

CHEHURA, E.; JAMES, S. W.; TATAM, R. P. Temperature and strain discrimination using a single tilted fibre bragg grating. *Optics Communications*, Elsevier, v. 275, n. 2, p. 344–347, 2007. Citado na página 77.

CHEN, F. et al. Dual-source distributed optical fiber sensor for simultaneous temperature and strain measurements. *Chinese Optics Letters*, Chinese Optical Society, v. 10, n. 6, p. 060601, 2012. Citado na página 77.

CHEN, S. et al. A low-cost, compact indoor thermal environment monitor. In: IEEE. *Proceedings of the 17th IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference [Cat. No. 00CH37066]*. [S.l.], 2000. v. 1, p. 290–294. Citado na página 78.

CHEN, X. et al. Optical sensor based on hybrid lpg/fbg in d-fiber for simultaneous refractive index and temperature measurement. In: SPIE. *Advanced Sensor Systems and Applications II*. [S.l.], 2005. v. 5634, p. 140–145. Citado 2 vezes nas páginas 84 e 85.

CHEN, Y. et al. A hybrid multimode interference structure-based refractive index and temperature fiber sensor. *IEEE Sensors Journal*, IEEE, v. 16, n. 2, p. 331–335, 2015. Citado na página 82.

- CHEN, Z. et al. Side polished fiber bragg grating sensor for simultaneous measurement of refractive index and temperature. In: SPIE. *21st International Conference on Optical Fiber Sensors*. [S.l.], 2011. v. 7753, p. 1260–1263. Citado na página 84.
- CHOI, H. Y. et al. Cross-talk free and ultra-compact fiber optic sensor for simultaneous measurement of temperature and refractive index. *Optics express*, Optica Publishing Group, v. 18, n. 1, p. 141–149, 2010. Citado 2 vezes nas páginas 86 e 87.
- CIBULA, E.; DONLAGIC, D. In-line short cavity fabry-perot strain sensor for quasi distributed measurement utilizing standard otdr. *Optics Express*, Optica Publishing Group, v. 15, n. 14, p. 8719–8730, 2007. Citado 2 vezes nas páginas 8 e 51.
- 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 na página 47.
- CUSCINÀ, D. Phase-coded brillouin optical correlation domain analysis for high-resolution distributed fiber sensing. Italy, 2019. Citado na página 29.
- DAKIN, J. et al. Distributed antistokes ratio thermometry. In: OPTICAL SOCIETY OF AMERICA. *Optical Fiber Sensors*. [S.l.], 1985. p. PDS3. Citado na página 53.
- DAKIN, J. et al. Distributed antistokes ratio thermometry. In: OPTICAL SOCIETY OF AMERICA. *Optical Fiber Sensors*. [S.l.], 1985a. p. PDS3. Citado 4 vezes nas páginas 8, 38, 52 e 53.
- 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 2 vezes nas páginas 32 e 39.
- DATTA, A. et al. Measurement accuracy enhancement with multi-event detection using the deep learning approach in raman distributed temperature sensors. *Optics Express*, Optica Publishing Group, v. 29, n. 17, p. 26745–26764, 2021. Citado 2 vezes nas páginas 32 e 59.
- DATTA, A.; SANKAR, V.; SRINIVASAN, B. Challenges and opportunities in distributed anti-stokes raman thermometry. *ISSS Journal of Micro and Smart Systems*, Springer, v. 11, n. 1, p. 179–206, 2022. Citado 15 vezes nas páginas 20, 22, 27, 28, 30, 31, 32, 40, 55, 56, 59, 60, 61, 62 e 64.
- DEGIOANNI, S. et al. Surface-enhanced raman scattering of amorphous silica gel adsorbed on gold substrates for optical fiber sensors. *Journal of Applied Physics*, AIP Publishing LLC, v. 118, n. 15, p. 153103, 2015. Citado na página 62.
- DING, Z. et al. Distributed optical fiber current sensor based on magnetostriction in ofdr. *IEEE Photonics Technology Letters*, IEEE, v. 27, n. 19, p. 2055–2058, 2015. Citado na página 50.
- DING, Z. et al. Distributed optical fiber sensors based on optical frequency domain reflectometry: A review. *Sensors*, MDPI, v. 18, n. 4, p. 1072, 2018. Citado na página 50.
- DONG, B. et al. Simultaneous strain and temperature measurement using a compact photonic crystal fiber inter-modal interferometer and a fiber bragg grating. *Applied optics*, Optica Publishing Group, v. 49, n. 32, p. 6232–6235, 2010. Citado na página 75.

DONG, S. et al. Optical and electrochemical measurements for optical fibre corrosion sensing techniques. *Corrosion science*, Elsevier, v. 48, n. 7, p. 1746–1756, 2006. Citado 3 vezes nas páginas 9, 66 e 67.

DONG, Y.; CHEN, L.; BAO, X. High-spatial-resolution time-domain simultaneous strain and temperature sensor using brillouin scattering and birefringence in a polarization-maintaining fiber. *IEEE Photonics Technology Letters*, IEEE, v. 22, n. 18, p. 1364–1366, 2010. Citado na página 76.

DOU, S. et al. Distributed acoustic sensing for seismic monitoring of the near surface: A traffic-noise interferometry case study. *Scientific reports*, Nature Publishing Group, v. 7, n. 1, p. 1–12, 2017. Citado na página 50.

DU, W.-C.; TAO, X.-M.; TAM, H.-Y. Fiber bragg grating cavity sensor for simultaneous measurement of strain and temperature. *IEEE Photonics Technology Letters*, IEEE, v. 11, n. 1, p. 105–107, 1999. Citado na página 75.

DYER, S. D. et al. Analysis of a distributed fiber-optic temperature sensor using single-photon detectors. *Optics express*, Optica Publishing Group, v. 20, n. 4, p. 3456–3466, 2012. Citado na página 60.

ECKE, W. et al. Optical fiber grating sensor network for monitoring refractive index and temperature distributions in fluids. In: SPIE. *Optical Diagnostics for Fluids/Heat/Combustion and Photomechanics for Solids*. [S.l.], 1999. v. 3783, p. 176–183. Citado na página 84.

EDOUCARD, M. N. et al. Application of fiber optics in oil and gas field development—a review. *Arabian Journal of Geosciences*, Springer, v. 15, n. 6, p. 539, 2022. Citado na página 22.

ENRÍQUEZ, D. A. C.; CRUZ, A. R. da; GIRALDI, M. T. M. R. Hybrid fbg–lpg sensor for surrounding refractive index and temperature simultaneous discrimination. *Optics & Laser Technology*, Elsevier, v. 44, n. 4, p. 981–986, 2012. Citado 2 vezes nas páginas 84 e 85.

FAJKUS, M. et al. Fbg sensor of breathing encapsulated into polydimethylsiloxane. In: INTERNATIONAL SOCIETY FOR OPTICS AND PHOTONICS. *Optical Materials and Biomaterials in Security and Defence Systems Technology XIII*. [S.l.], 2016. v. 9994, p. 99940N. Citado na página 77.

FAN, L. et al. In-situ monitoring of corrosion-induced expansion and mass loss of steel bar in steel fiber reinforced concrete using a distributed fiber optic sensor. *Composites Part B: Engineering*, Elsevier, v. 165, p. 679–689, 2019. Citado na página 71.

FAN, L. et al. Monitoring corrosion of steel bars in reinforced concrete based on helix strains measured from a distributed fiber optic sensor. *Engineering Structures*, Elsevier, v. 204, p. 110039, 2020. Citado na página 71.

FEIJÃO, C. H. L. Contribuição ao estudo dos sensores de corrosão para estruturas de concreto armado. 2010. Citado 2 vezes nas páginas 20 e 41.

FONTANA, E.; PANTELL, R. Characterization of multilayer rough surfaces by use of surface-plasmon spectroscopy. *Physical Review B*, APS, v. 37, n. 7, p. 3164, 1988. Citado 2 vezes nas páginas 41 e 115.

FRAZAO, O.; SANTOS, J. Simultaneous measurement of strain and temperature using a bragg grating structure written in germanosilicate fibres. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, IOP Publishing, v. 6, n. 6, p. 553, 2004. Citado na página 75.

FREDJ, N. et al. Corrosion of carbon steel in waters of varying purity and velocity. In: ONEPETRO. *CORROSION 2012*. [S.l.], 2012. Citado 2 vezes nas páginas 117 e 123.

GASSER, J. et al. Distributed temperature sensor combining centimeter resolution with hundreds of meters sensing range. *Optics Express*, Optica Publishing Group, v. 30, n. 5, p. 6768–6777, 2022. Citado na página 61.

GENTIL, V. C. 6ª edição. *Rio de Janeiro: LTC (grupo GEN)*, 2011. Citado 3 vezes nas páginas 20, 22 e 23.

GIALLORENZI, T. G. et al. Optical fiber sensor technology. *IEEE transactions on microwave theory and techniques*, IEEE, v. 30, n. 4, p. 472–511, 1982. Citado na página 47.

GOUVEIA, C. et al. Fabry–pérot cavity based on a high-birefringent fiber bragg grating for refractive index and temperature measurement. *IEEE Sensors Journal*, IEEE, v. 12, n. 1, p. 17–21, 2011. Citado na página 85.

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 4 vezes nas páginas 49, 54, 55 e 68.

GRATTAN, S. K. et al. Monitoring of corrosion in structural reinforcing bars: performance comparison using in situ fiber-optic and electric wire strain gauge systems. *IEEE Sensors Journal*, IEEE, v. 9, n. 11, p. 1494–1502, 2009. Citado na página 68.

GUO, T. et al. Fbg-type sensor for simultaneous measurement of temperature and force based on reflection spectrum broadening. In: SPIE. *Passive Components and Fiber-based Devices II*. [S.l.], 2005. v. 6019, p. 397–402. Citado na página 85.

GWANDU, B. A. et al. Simultaneous refractive index and temperature measurement using cascaded long-period grating in double-cladding fibre. *Electronics Letters*, IET, v. 38, n. 14, p. 695–696, 2002. Citado 3 vezes nas páginas 79, 84 e 85.

HAN, Q. et al. Long-period grating inscribed on concatenated double-clad and single-clad fiber for simultaneous measurement of temperature and refractive index. *IEEE Photonics Technology Letters*, IEEE, v. 24, n. 13, p. 1130–1132, 2012. Citado 2 vezes nas páginas 84 e 85.

HAN, Y.-G. et al. Simultaneous measurement of bending and temperature based on a single sampled chirped fiber bragg grating embedded on a flexible cantilever beam. *Optics letters*, Optica Publishing Group, v. 31, n. 19, p. 2839–2841, 2006. Citado na página 85.

HAN, Y.-G. et al. Multiwavelength raman-fiber-laser-based long-distance remote sensor for simultaneous measurement of strain and temperature. *Optics letters*, Optical Society of America, v. 30, n. 11, p. 1282–1284, 2005. Citado na página 75.

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 54.

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 8, 53 e 54.

HARTOG, A.; PAYNE, D. Remote measurement of temperature distribution using an optical fibre. 1982. Citado na página 52.

HARTOG, A.; PAYNE, D.; CONDUIT, A. Polarisation optical-time-domain reflectometry: experimental results and application to loss and birefringence measurements in single-mode optical fibres. 1980. Citado na página 47.

HAUS, J. *Optical Sensors*. [S.l.]: Wiley Online Library, 2010. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 47.

HEADLEY, C.; AGRAWAL, G. *Raman amplification in fiber optical communication systems*. [S.l.]: Academic press, 2005. Citado na página 27.

HECHT, E. *Optics, 5e*. [S.l.]: Pearson Education India, 2002. Citado na página 44.

HEIDERSBACH, R. *Metallurgy and Corrosion Control in Oil and Gas Production*, John Willey & Sons. [S.l.]: Inc, 2011. Citado 4 vezes nas páginas 112, 115, 117 e 123.

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 55.

HU, L. et al. Simultaneous measurement of distributed temperature and strain through brillouin frequency shift using a common communication optical fiber. *International Journal of Optics*, Hindawi Limited, v. 2021, p. 1–6, 2021. Citado na página 76.

HU, T.; ZHAO, Y.; SONG, A.-n. Fiber optic spr sensor for refractive index and temperature measurement based on mmf-fbg-mm structure. *Sensors and Actuators B: Chemical*, Elsevier, v. 237, p. 521–525, 2016. Nenhuma citação no texto.

HU, W. et al. Fe–c-coated fibre bragg grating sensor for steel corrosion monitoring. *Corrosion Science*, Elsevier, v. 53, n. 5, p. 1933–1938, 2011. Citado 2 vezes nas páginas 68 e 69.

HU, W. et al. Optical fiber polarizer with fe–c film for corrosion monitoring. *IEEE Sensors Journal*, IEEE, v. 17, n. 21, p. 6904–6910, 2017. Citado 2 vezes nas páginas 70 e 71.

HUANG, L.; FAN, X.; HE, Z. Hybrid distributed fiber-optic sensing system by using rayleigh backscattering lightwave as probe of stimulated brillouin scattering. *Journal of Lightwave Technology*, IEEE, 2022. Citado na página 29.

Huang, Q. et al. New type of fiber optic sensor network for smart grid interface of transmission system. In: *IEEE PES General Meeting*. [S.l.: s.n.], 2010. p. 1–5. Citado na página 20.

IADICICCO, A. et al. Nonuniform thinned fiber bragg gratings for simultaneous refractive index and temperature measurements. *IEEE Photonics Technology Letters*, IEEE, v. 17, n. 7, p. 1495–1497, 2005. Citado na página 84.

JIANG, Y. et al. Multi-parameter sensing using a fiber bragg grating inscribed in dual-mode fiber. *IEEE Photonics Technology Letters*, IEEE, v. 29, n. 19, p. 1607–1610, 2017. Citado na página 85.

JIAO, Y. et al. Open-cavity fabry-perot interferometer pressure and temperature fiber sensor based on photonic crystal fiber. In: *IEEE. 2017 16th International Conference on Optical Communications and Networks (ICOON)*. [S.l.], 2017. p. 1–3. Citado na página 80.

JONES, J. D. Review of fibre sensor techniques for temperature-strain discrimination. In: OPTICAL SOCIETY OF AMERICA. *Optical Fiber Sensors*. [S.l.], 1997. p. OTuC1. Citado 3 vezes nas páginas 75, 77 e 78.

JORGE, P. A. et al. Fiber optic-based refractive index sensing at inesc porto. *Sensors, Molecular Diversity Preservation International (MDPI)*, v. 12, n. 6, p. 8371–8389, 2012. Citado na página 44.

JÚNIOR, V. M. d. S.; NASCIMENTO, J. F.; FILHO, J. F. M. Analysis of d-shaped optical fiber based corrosion sensor using lmr and spr effects. *Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications*, SciELO Brasil, v. 20, p. 585–599, 2021. Citado 2 vezes nas páginas 71 e 72.

KAWAMURA, M. et al. Humidity and temperature sensing using an optical fiber and a corner cube prism. *Japanese journal of applied physics*, IOP Publishing, v. 38, n. 2R, p. 849, 1999. Citado na página 78.

KELLY, P. J.; ARNELL, R. D. Magnetron sputtering: a review of recent developments and applications. *Vacuum*, Elsevier, v. 56, n. 3, p. 159–172, 2000. Citado 3 vezes nas páginas 111, 112 e 114.

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 49 e 51.

KERSEY, A. D. Multiplexed fiber optic sensors. *Distributed and Multiplexed Fiber Optic Sensors II*, SPIE, v. 1797, p. 161–185, 1993. Citado na página 51.

KERSEY, A. D.; PATRICK, H. J. *Hybrid fiber bragg grating/long period fiber grating sensor for strain/temperature discrimination*. [S.l.]: Google Patents, 1999. US Patent 5,945,666. Citado na página 77.

KIM, D. W. et al. Simultaneous measurement of refractive index and temperature based on a reflection-mode long-period grating and an intrinsic fabry–perot interferometer sensor. *Optics letters*, Optica Publishing Group, v. 30, n. 22, p. 3000–3002, 2005. Citado na página 83.

KIM, H.-J.; HAN, Y.-G. Polarization-dependent in-line mach–zehnder interferometer for discrimination of temperature and ambient index sensitivities. *Journal of lightwave technology*, IEEE, v. 30, n. 8, p. 1037–1041, 2011. Citado na página 82.

KIM, M. et al. Simultaneous measurement of temperature and strain based on double cladding fiber interferometer assisted by fiber grating pair. *IEEE Photonics Technology Letters*, IEEE, v. 20, n. 15, p. 1290–1292, 2008. Citado na página 75.

KISAŁA, P.; HARASIM, D.; MROCZKA, J. Temperature-insensitive simultaneous rotation and displacement (bending) sensor based on tilted fiber bragg grating. *Optics express*, Optica Publishing Group, v. 24, n. 26, p. 29922–29929, 2016. Citado na página 85.

KÖHLER, M. *Etching in microsystem technology*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2008. Citado 2 vezes nas páginas 120 e 123.

KUZNETSOV, A. G. et al. Ultralong fibre-optic distributed raman temperature sensor. *Quantum Electronics*, IOP Publishing, v. 47, n. 10, p. 967, 2017. Citado na página 63.

LAAROSS, I. et al. Rotdr signal enhancement via deep convolutional denoising autoencoders trained with domain randomization. In: SPIE. *Seventh European Workshop on Optical Fibre Sensors*. [S.l.], 2019. v. 11199, p. 553–556. Citado na página 60.

LAAROSS, I.; QUINTELA-INCERA, M. Á.; LÓPEZ-HIGUERA, J. M. Comparative experimental study of a high-temperature raman-based distributed optical fiber sensor with different special fibers. *Sensors*, MDPI, v. 19, n. 3, p. 574, 2021. Citado 3 vezes nas páginas 58, 59 e 60.

LAMM, H. Biegsame optische gerate. *Zeitschrift fur Instrumeten Kunde*, v. 50, p. 579–581, 1930. Citado na página 19.

LANCIANO, C.; SALVINI, R. Monitoring of strain and temperature in an open pit using brillouin distributed optical fiber sensors. *Sensors*, MDPI, v. 20, n. 7, p. 1924, 2020. Citado na página 75.

LANTICQ, V. et al. Brillouin sensing cable: Design and experimental validation. *IEEE Sensors Journal*, IEEE, v. 8, n. 7, p. 1194–1201, 2008. Citado 2 vezes nas páginas 75 e 76.

LAUBER, T.; LEES, G. Enhanced temperature measurement performance: Fusing dts and das results. *IEEE Sensors Journal*, IEEE, v. 21, n. 6, p. 7948–7953, 2020. Citado na página 63.

LEAL-JUNIOR, A. G. et al. Multiplexing technique for quasi-distributed sensors arrays in polymer optical fiber intensity variation-based sensors. *Optics & Laser Technology*, Elsevier, v. 111, p. 81–88, 2019. Citado na página 51.

LEE, B. Review of the present status of optical fiber sensors. *Optical fiber technology*, Elsevier, v. 9, n. 2, p. 57–79, 2003. Citado na página 47.

LEE, S.-M.; SAINI, S. S.; JEONG, M.-Y. Simultaneous measurement of refractive index, temperature, and strain using etched-core fiber bragg grating sensors. *IEEE Photonics Technology Letters*, IEEE, v. 22, n. 19, p. 1431–1433, 2010. Citado na página 85.

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 54.

LEUNG, C. K.; WAN, K. T.; CHEN, L. A novel optical fiber sensor for steel corrosion in concrete structures. *Sensors*, Molecular Diversity Preservation International, v. 8, n. 3, p. 1960–1976, 2008. Citado na página 68.

LI, C. et al. Fbg arrays for quasi-distributed sensing: A review. *Photonic Sensors*, Springer, v. 11, p. 91–108, 2021. Citado na página 51.

LI, H. et al. Ultra-high sensitive quasi-distributed acoustic sensor based on coherent otdr and cylindrical transducer. *Journal of Lightwave Technology*, IEEE, v. 38, n. 4, p. 929–938, 2019. Citado na página 51.

LI, J. et al. Performance improvement of raman distributed temperature system by using noise suppression. *Photonic Sensors*, Springer, v. 8, p. 103–113, 2018. Citado na página 59.

LI, J. et al. Performance improvement in double-ended rdts by suppressing the local external physics perturbation and intermodal dispersion. *Chinese Optics Letters*, Chinese Optical Society, v. 17, n. 7, p. 070602, 2019. Citado na página 60.

LI, J. et al. Reconstruction compression correlation demodulation for raman optical time domain reflection. *Advanced Photonics Research*, Wiley Online Library, v. 2, n. 10, p. 2100047, 2021. Citado na página 60.

LI, J. et al. Temperature resolution improvement in raman-based fiber-optic distributed sensor using dynamic difference attenuation recognition. *Sensors*, MDPI, v. 20, n. 23, p. 6922, 2020. Citado 2 vezes nas páginas 60 e 63.

LI, M. et al. Fiber-optic sensor tip for measuring temperature and liquid refractive index. *Optical Engineering*, Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, v. 53, n. 11, p. 116110–116110, 2014. Citado na página 86.

LI, W.; ABEYSINGHE, D. C.; BOYD, J. T. Multiplexed sensor system for simultaneous measurement of pressure and temperature. *Optical Engineering*, Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, v. 43, n. 1, p. 148–156, 2004. Citado na página 80.

LI, X. et al. Fiber optic corrosion sensor fabricated by electrochemical method. In: INTERNATIONAL SOCIETY FOR OPTICS AND PHOTONICS. *Smart Structures and Materials 1998: Sensory Phenomena and Measurement Instrumentation for Smart Structures and Materials*. [S.l.], 1998. v. 3330, p. 126–133. Citado na página 65.

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 na página 48.

LI, X.-G. et al. Measurement of magnetic field and temperature based on fiber-optic composite interferometer. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, IEEE, v. 66, n. 7, p. 1906–1911, 2017. Citado na página 84.

LI, Y. et al. Double-pass in-line fiber taper mach–zehnder interferometer sensor. *IEEE Photonics Technology Letters*, IEEE, v. 22, n. 23, p. 1750–1752, 2010. Citado na página 82.

LI, Y.; WANG, Y.; WEN, C. Temperature and strain sensing properties of the zinc coated fbg. *Optik*, Elsevier, v. 127, n. 16, p. 6463–6469, 2016. Citado na página 77.

LI, Z. et al. Temperature and strain discrimination in botda fiber sensor by utilizing dispersion compensating fiber. *IEEE Sensors Journal*, IEEE, v. 18, n. 17, p. 7100–7105, 2018. Citado 2 vezes nas páginas 75 e 76.

LI, Z. et al. Fiber distributed acoustic sensing using convolutional long short-term memory network: a field test on high-speed railway intrusion detection. *Optics express*, Optica Publishing Group, v. 28, n. 3, p. 2925–2938, 2020. Citado na página 60.

LIAO, C.; CHEN, H.; WANG, D. Ultracompact optical fiber sensor for refractive index and high-temperature measurement. *Journal of Lightwave Technology*, IEEE, v. 32, n. 14, p. 2531–2535, 2014. Citado na página 82.

LIAO, C. et al. Fiber in-line mach–zehnder interferometer embedded in fbg for simultaneous refractive index and temperature measurement. *IEEE Photonics Technology Letters*, IEEE, v. 22, n. 22, p. 1686–1688, 2010. Citado 2 vezes nas páginas 20 e 79.

LIU, B. et al. Sapphire-fiber-based distributed high-temperature sensing system. *Optics letters*, Optica Publishing Group, v. 41, n. 18, p. 4405–4408, 2016. Citado na página 50.

LIU, H. et al. Simultaneous measurement of humidity and temperature based on a long-period fiber grating inscribed in fiber loop mirror. *IEEE Sensors Journal*, IEEE, v. 14, n. 3, p. 893–896, 2013. Citado na página 78.

LIU, J.; WANG, D.; ZHANG, L. Slightly tapered optical fiber with dual inner air-cavities for simultaneous refractive index and temperature measurement. *Journal of Lightwave Technology*, IEEE, v. 34, n. 21, p. 4872–4876, 2016. Citado 2 vezes nas páginas 82 e 83.

LIU, Q. et al. Highly integrated fp/fbg sensor for simultaneous measurement of high temperature and strain. *IEEE photonics technology letters*, IEEE, v. 26, n. 17, p. 1715–1717, 2014. Citado na página 75.

LIU, T. et al. Sensor based on macrobent fiber bragg grating structure for simultaneous measurement of refractive index and temperature. *Applied Optics*, Optica Publishing Group, v. 55, n. 4, p. 791–795, 2016. Citado 2 vezes nas páginas 85 e 86.

LIU, Y. et al. Long-range raman distributed temperature sensor with high spatial and temperature resolution using graded-index few-mode fiber. *Optics express*, Optica Publishing Group, v. 26, n. 16, p. 20562–20571, 2018. Citado na página 63.

LIU, Y.-g. et al. Micro-structured optical fiber sensor for simultaneous measurement of temperature and refractive index. *Optical Fiber Technology*, Elsevier, v. 41, p. 168–172, 2018. Citado na página 85.

LU, F. et al. Distributed fiber optic ph sensor for the application in the wellbore. In: THE ELECTROCHEMICAL SOCIETY, INC. *Electrochemical Society Meeting Abstracts* 235. [S.l.], 2019. p. 2016–2016. Citado na página 50.

LU, P. et al. Real-time monitoring of temperature rises of energized transformer cores with distributed optical fiber sensors. *IEEE Transactions on Power Delivery*, IEEE, v. 34, n. 4, p. 1588–1598, 2019. Citado na página 50.

LUAN, N.; DING, C.; YAO, J. A refractive index and temperature sensor based on surface plasmon resonance in an exposed-core microstructured optical fiber. *IEEE Photonics Journal*, IEEE, v. 8, n. 2, p. 1–8, 2016. Nenhuma citação no texto.

LUO, D. et al. A recent progress of steel bar corrosion diagnostic techniques in rc structures. *Sensors*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 19, n. 1, p. 34, 2019. Citado na página 47.

LUO, H. et al. Microfiber-based inline mach–zehnder interferometer for dual-parameter measurement. *IEEE Photonics Journal*, IEEE, v. 7, n. 2, p. 1–8, 2015. Citado 3 vezes nas páginas 9, 82 e 83.

MA, J. et al. Experimental study on a novel corrosion sensor for steel strand using fbg. In: SPIE. *Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems 2021*. [S.l.], 2021. v. 11591, p. 422–426. Citado 2 vezes nas páginas 71 e 72.

MACDONALD, R. Frequency domain optical reflectometer. *Applied Optics*, Optical Society of America, v. 20, n. 10, p. 1840–1844, 1981. Citado na página 50.

MAHESHWARI, M. et al. Wavelength-shifted chirped fbgs for temperature compensated strain measurement. *Sensors and Actuators A: Physical*, Elsevier, v. 265, p. 231–235, 2017. Citado na página 77.

- MALAKZADEH, A.; DIDAR, M.; MANSOURSAMAEI, M. Snr enhancement of a raman distributed temperature sensor using partial window-based non local means method. *Optical and Quantum Electronics*, Springer, v. 53, p. 1–14, 2021. Citado na página 63.
- MANNHEIMER, W. A. *Microscopia dos materiais: uma introdução*. [S.l.]: Editora E-papers, 2002. Citado 2 vezes nas páginas 101 e 102.
- MARTINS-FILHO, J. F.; FONTANA, E. *Optical fibre sensor system for multipoint corrosion detection*. [S.l.]: INTECH Open Access Publisher, 2009. Citado na página 112.
- MARTINS-FILHO, J. F. et al. Fiber-optic-based corrosion sensor using otdr. In: IEEE. *SENSORS, 2007 IEEE*. [S.l.], 2007. p. 1172–1174. Citado 9 vezes nas páginas 9, 21, 35, 66, 67, 112, 115, 120 e 133.
- 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 29.
- MAUGHAN, S. M.; KEE, H. H.; NEWSON, T. P. Simultaneous distributed fibre temperature and strain sensor using microwave coherent detection of spontaneous brillouin backscatter. *Measurement Science and Technology*, IOP Publishing, v. 12, n. 7, p. 834, 2001. Citado 2 vezes nas páginas 28 e 29.
- MCCAGUE, C. et al. Novel sensor design using photonic crystal fibres for monitoring the onset of corrosion in reinforced concrete structures. *Journal of lightwave technology*, IEEE, v. 32, n. 5, p. 891–896, 2014. Citado na página 69.
- MEN, L.; LU, P.; CHEN, Q. A multiplexed fiber bragg grating sensor for simultaneous salinity and temperature measurement. *Journal of Applied Physics*, American Institute of Physics, v. 103, n. 5, p. 053107, 2008. Citado na página 79.
- MONDAL, S. K. et al. Embedded dual fiber bragg grating sensor for simultaneous measurement of temperature and load (strain) with enhanced sensitivity. *Microwave and Optical Technology Letters*, Wiley Online Library, v. 51, n. 7, p. 1621–1624, 2009. Citado na página 75.
- MOREY, W. W.; DUNPHY, J. R.; MELTZ, G. Multiplexing fiber bragg grating sensors. *Fiber & Integrated Optics*, Taylor & Francis, v. 10, n. 4, p. 351–360, 1991. Citado na página 51.
- MOSLAN, M. S. et al. Real-time fluid flow movement identification in porous media for reservoir monitoring application using polycarbonate optical fibre bragg grating sensor. *Sensors and Actuators A: Physical*, Elsevier, v. 354, p. 114246, 2023. Citado na página 22.
- MUNN, J. D. et al. Novel cable coupling technique for improved shallow distributed acoustic sensor vsps. *Journal of Applied Geophysics*, Elsevier, v. 138, p. 72–79, 2017. Citado na página 50.
- MURRAY, M. J. et al. Dynamic temperature-strain discrimination using a hybrid distributed fiber sensor based on brillouin and rayleigh scattering. *Optics Express*, Optica Publishing Group, v. 31, n. 1, p. 287–300, 2023. Citado na página 77.
- NASCIMENTO, J. F. et al. Amplified otdr systems for multipoint corrosion monitoring. *Sensors, Molecular Diversity Preservation International*, v. 12, n. 3, p. 3438–3448, 2012. Citado 7 vezes nas páginas 9, 21, 69, 70, 112, 119 e 133.

NASCIMENTO, J. F. d. Sensor multiponto de corrosão baseado em reflectometria amplificada em fibra óptica. Universidade Federal de Pernambuco, 2013. Citado 2 vezes nas páginas 23 e 112.

OLIVEIRA, H. J. de et al. Corrosion sensor using metallic double layer in optical fiber. *Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications*, SciELO Brasil, v. 20, p. 513–525, 2021. Citado 6 vezes nas páginas 9, 71, 72, 73, 117 e 123.

OLIVEIRA, R. et al. Simultaneous measurement of strain, temperature and refractive index based on multimode interference, fiber tapering and fiber bragg gratings. *Measurement Science and Technology*, IOP Publishing, v. 27, n. 7, p. 075107, 2016. Citado na página 85.

OSUCH, T. et al. Simultaneous measurement of liquid level and temperature using tilted fiber bragg grating. *IEEE Sensors Journal*, IEEE, v. 16, n. 5, p. 1205–1209, 2015. Citado 2 vezes nas páginas 78 e 85.

OUYANG, Y. et al. An in-fiber dual air-cavity fabry–perot interferometer for simultaneous measurement of strain and directional bend. *IEEE Sensors Journal*, IEEE, v. 17, n. 11, p. 3362–3366, 2017. Citado 2 vezes nas páginas 75 e 80.

PALMIERI, L.; SARCHI, D.; GALTAROSSA, A. Distributed measurement of high electric current by means of polarimetric optical fiber sensor. *Optics Express*, Optica Publishing Group, v. 23, n. 9, p. 11073–11079, 2015. Citado na página 50.

PAN, L. et al. A de-noising algorithm based on eemd in raman-based distributed temperature sensor. *IEEE Sensors Journal*, IEEE, v. 17, n. 1, p. 134–138, 2016. Citado na página 59.

PANDIAN, C. et al. Single-fiber grid for improved spatial resolution in distributed fiber optic sensor. *Optics letters*, Optica Publishing Group, v. 35, n. 10, p. 1677–1679, 2010. Citado na página 60.

PANG, C. et al. Mems fabry-perot sensor interrogated by optical system-on-a-chip for simultaneous pressure and temperature sensing. *Optics express*, Optica Publishing Group, v. 21, n. 19, p. 21829–21839, 2013. Citado na página 80.

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 na página 56.

PARK, M. et al. All-fiber micro air cavity mach-zehnder interferometer formed by femtosecond laser micromachining. In: IEEE. *OECC/ACOFT 2008-Joint Conference of the Opto-Electronics and Communications Conference and the Australian Conference on Optical Fibre Technology*. [S.l.], 2008. p. 1–2. Citado na página 79.

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 2 vezes nas páginas 75 e 76.

PATIL, J. J.; PATIL, Y. H.; GHOSH, A. Comprehensive and analytical review on optical fiber refractive index sensor. In: IEEE. *2020 4th International Conference on Trends in Electronics and Informatics (ICOEI)*(48184). [S.l.], 2020. p. 169–175. Citado 3 vezes nas páginas 20, 22 e 44.

PATRICK, H. et al. Hybrid fiber bragg grating/long period fiber grating sensor for strain/temperature discrimination. *IEEE Photonics Technology Letters*, IEEE, v. 8, n. 9, p. 1223–1225, 1996. Citado na página 77.

PECHSTEDT, R. Fibre optical sensor for simultaneous measurement of pressure, temperature and refractive index. In: SPIE. *23rd International Conference on Optical Fibre Sensors*. [S.l.], 2014. v. 9157, p. 61–64. Citado na página 86.

PENG, J. et al. Distributed temperature and strain measurement based on brillouin gain spectrum and brillouin beat spectrum. *IEEE photonics technology letters*, IEEE, v. 33, n. 21, p. 1217–1220, 2021. Citado na página 75.

PEVEC, S.; DONLAGIC, D. Miniature all-fiber fabry–perot sensor for simultaneous measurement of pressure and temperature. *Applied optics*, Optica Publishing Group, v. 51, n. 19, p. 4536–4541, 2012. Citado na página 80.

PEVEC, S.; DONLAGIC, D. High resolution, all-fiber, micro-machined sensor for simultaneous measurement of refractive index and temperature. *Optics express*, Optica Publishing Group, v. 22, n. 13, p. 16241–16253, 2014. Citado 2 vezes nas páginas 79 e 80.

PEVEC, S.; DONLAGIC, D. Miniature all-silica fiber-optic sensor for simultaneous measurement of relative humidity and temperature. *Optics Letters*, Optical Society of America, v. 40, n. 23, p. 5646–5649, 2015. Citado 2 vezes nas páginas 78 e 80.

PEVEC, S.; DONLAGIC, D. Multiparameter fiber-optic sensor for simultaneous measurement of thermal conductivity, pressure, refractive index, and temperature. *IEEE Photonics Journal*, IEEE, v. 9, n. 1, p. 1–14, 2017. Citado 3 vezes nas páginas 80, 84 e 85.

PEVEC, S.; DONLAGIC, D. Miniature fiber-optic fabry-perot refractive index sensor for gas sensing with a resolution of 5×10^{-9} riu. *Optics express*, Optica Publishing Group, v. 26, n. 18, p. 23868–23882, 2018. Citado na página 80.

PEVEC, S.; DONLAGIĆ, D. Multiparameter fiber-optic sensors: A review. *Optical Engineering*, Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, v. 58, n. 7, p. 072009–072009, 2019. Citado 7 vezes nas páginas 74, 75, 80, 81, 82, 84 e 121.

PEVEC, S.; DONLAGIC, D. Multiparameter fiber-optic sensor for simultaneous measurement of thermal conductivity, pressure, refractive index, and temperature. *IEEE Photonics Journal*, IEEE, v. 9, n. 1, p. 1–14, 2021. Citado 4 vezes nas páginas 19, 20, 21 e 121.

POPOOLA, L. T. et al. Corrosion problems during oil and gas production and its mitigation. *International Journal of Industrial Chemistry*, Springer, v. 4, p. 1–15, 2013. Citado na página 112.

PUTTEN, A. F. V. et al. Multiple-sensor micro-system for pulmonary function diagnostics for copd and asthma patients. In: IEEE. *1st Annual International IEEE-EMBS Special Topic Conference on Microtechnologies in Medicine and Biology. Proceedings (Cat. No. 00EX451)*. [S.l.], 2000. p. 567–571. Citado na página 78.

QIAO, G.; ZHOU, Z.; OU, J. Thin fe-c alloy solid film based fiber optic corrosion sensor. In: IEEE. *2006 1st IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems*. [S.l.], 2006. p. 541–544. Citado 5 vezes nas páginas 22, 41, 42, 43 e 66.

- RAJINIKUMAR, R. et al. Fiber bragg grating sensors for measuring temperature and strain simultaneously at cryogenic temperature. In: AMERICAN INSTITUTE OF PHYSICS. *AIP Conference Proceedings*. [S.l.], 2008. v. 985, n. 1, p. 383–390. Citado na página 75.
- RAMAKRISHNAN, M. et al. Overview of fiber optic sensor technologies for strain/temperature sensing applications in composite materials. *Sensors*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 16, n. 1, p. 99, 2016. Citado na página 77.
- RAMANI, V.; KUANG, K. S. C. Monitoring of rebar corrosion in concrete structures using a lens-based plastic optical fiber (lpof) sensor. *Construction and Building Materials*, Elsevier, v. 276, p. 122129, 2021. Citado 3 vezes nas páginas 20, 71 e 72.
- RAN, Z. et al. Laser-machined cascaded micro cavities for simultaneous measurement of dual parameters under high temperature. *IEEE Sensors Journal*, IEEE, v. 13, n. 5, p. 1988–1991, 2013. Citado 3 vezes nas páginas 75, 80 e 86.
- RAO, Y.-J. et al. In-line fiber fabry-perot refractive-index tip sensor based on endlessly photonic crystal fiber. *Sensors and Actuators A: Physical*, Elsevier, v. 148, n. 1, p. 33–38, 2008. Citado na página 79.
- RAO, Y.-J. et al. Hybrid lpfg/mefpi sensor for simultaneous measurement of high-temperature and strain. *Optics express*, Optica Publishing Group, v. 15, n. 22, p. 14936–14941, 2007. Citado na página 75.
- REN, L. et al. Pipeline corrosion and leakage monitoring based on the distributed optical fiber sensing technology. *Measurement*, Elsevier, v. 122, p. 57–65, 2018. Citado na página 71.
- REVIE, R. W. *Corrosion and corrosion control: an introduction to corrosion science and engineering*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2008. Citado na página 117.
- RIBEIRO, J. A. J. Características da propagação em fibras ópticas. *Instituto Nacional de Telecomunicações*, 1999. Citado na página 33.
- RIBEIRO, J. A. J. Comunicações ópticas, 4a edição. *São Paulo: Editora Érica*, 2007. Citado na página 33.
- ROGERS, A. Polarisation optical time domain reflectometry. *Electronics Letters*, IET, v. 16, n. 13, p. 489–490, 1980. Citado na página 49.
- 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 47.
- ROSOLEM, J. B. et al. Tecnologias de monitoração de hidrogeradores utilizando sensores ópticos. *Cad. CPqD Tecnologia*, v. 6, n. 1, p. 21–30, 2010. Citado na página 63.
- ROSSETTO, J. F. et al. Sensor distribuído de temperatura e deformação mecânica utilizando o espalhamento brillouin estimulado em fibras ópticas. [sn], 2000. Citado na página 77.
- ROSSETTO, J. F. et al. Sensores distribuídos utilizando efeitos não-lineares em fibras ópticas para aplicação em estruturas inteligentes. [sn], 2004. Citado na página 34.
- RUI, Y. et al. Integrity testing of pile cover using distributed fibre optic sensing. *Sensors*, MDPI, v. 17, n. 12, p. 2949, 2017. Citado na página 50.

- RUTHERFORD, P. S. et al. Novel nde fiber optic corrosion sensor. In: INTERNATIONAL SOCIETY FOR OPTICS AND PHOTONICS. *Smart Structures and Materials 1996: Smart Sensing, Processing, and Instrumentation*. [S.l.], 1996. v. 2718, p. 158–169. Citado na página 65.
- SANTOS, D. F.; GUERREIRO, A.; BAPTISTA, J. M. Simultaneous plasmonic measurement of refractive index and temperature based on a d-type fiber sensor with gold wires. *IEEE Sensors Journal*, IEEE, v. 17, n. 8, p. 2439–2446, 2017. Nenhuma citação no texto.
- SAUTER, E. *Nonlinear optics*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 1996. v. 44. Citado na página 31.
- SAXENA, M. K. et al. Raman optical fiber distributed temperature sensor using wavelet transform based simplified signal processing of raman backscattered signals. *Optics & Laser Technology*, Elsevier, v. 65, p. 14–24, 2015. Citado na página 59.
- 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 29.
- SENIOR, J. M.; JAMRO, M. Y. *Optical fiber communications: principles and practice*. [S.l.]: Pearson Education, 2009. Citado 2 vezes nas páginas 34 e 35.
- SHADARAM, M. *Optical frequency domain reflectometry*. Tese (Doutorado), 1984. Citado 2 vezes nas páginas 33 e 50.
- SHANG, K. et al. Fibre optic sensors for the monitoring of rotating electric machines: a review. *Optical and Quantum Electronics*, Springer, v. 53, p. 1–28, 2021. Citado na página 21.
- SHAO, L.-Y. et al. Optical refractive-index sensor based on dual fiber-bragg gratings interposed with a multimode-fiber taper. *IEEE Photonics Technology Letters*, IEEE, v. 19, n. 1, p. 30–32, 2007. Citado na página 79.
- SHENG, L. et al. Distributed fiberoptic sensor for simultaneous temperature and strain monitoring based on brillouin scattering effect in polyimide-coated fibers. *International Journal of Optics*, Hindawi Limited, v. 2020, p. 1–5, 2020. Citado na página 76.
- SHI, F. et al. Simultaneous measurement of refractive index and temperature base on three-beam interferometric fiber-optic. In: IEEE. *2015 Optoelectronics Global Conference (OGC)*. [S.l.], 2015. p. 1–3. Citado na página 86.
- SHU, X. et al. Sampled fiber bragg grating for simultaneous refractive-index and temperature measurement. *Optics Letters*, Optical Society of America, v. 26, n. 11, p. 774–776, 2001. Citado na página 79.
- SILVA, L. C. et al. Analytical investigation of the receiver for raman-based distributed temperature sensors. *Optical Fiber Technology*, Elsevier, v. 63, p. 102484, 2021. Citado 3 vezes nas páginas 60, 61 e 74.
- SILVA, L. C. et al. Detection of multiple small temperature events simultaneously on a distributed temperature map. *IEEE Sensors Journal*, IEEE, v. 21, n. 4, p. 4582–4589, 2020. Citado na página 61.
- SILVA, L. C.; SEGATTO, M. E.; CASTELLANI, C. E. Raman scattering-based distributed temperature sensors: a comprehensive literature review over the past 37 years and towards new avenues. *Optical Fiber Technology*, Elsevier, v. 74, p. 103091, 2022. Citado 10 vezes nas páginas 20, 32, 33, 39, 40, 48, 52, 55, 59 e 64.

- SILVA, L. C. B. da et al. Narx neural network model for strong resolution improvement in a distributed temperature sensor. *Applied optics*, Optica Publishing Group, v. 57, n. 20, p. 5859–5864, 2018. Citado na página 60.
- SILVA, M. S. et al. Impact of pulse width on the sensitivity and range of a raman-based distributed fiberoptic temperature sensor. *Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications*, SciELO Brasil, v. 17, n. 4, p. 539–551, 2018. Citado na página 97.
- SINGH, H.; SIRKIS, J. S. Simultaneously measuring temperature and strain using optical fiber microcavities. *Journal of lightwave technology*, IEEE, v. 15, n. 4, p. 647–653, 1997. Citado 2 vezes nas páginas 75 e 80.
- SINGH, S. Refractive index measurement and its applications. *Physica Scripta*, IOP Publishing, v. 65, n. 2, p. 167, 2002. Citado na página 44.
- 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 2 vezes nas páginas 31 e 96.
- SMITH, J. et al. Simultaneous distributed strain and temperature measurement. *Applied optics*, Optical Society of America, v. 38, n. 25, p. 5372–5377, 1999. Citado na página 75.
- SOHMA, K.; HATTORI, T. Heat-resistant thin optical fiber for sensing in high-temperature environments. *Sei Technical Review*, n. 74, p. 61, 2012. Citado na página 100.
- SOHMA, K.; HATTORI, T. Heat-resistant thin optical fiber for sensing in high-temperature environments. *Sei Technical Review*, n. 74, p. 61, 2012. Citado na página 102.
- SONG, Q. et al. Deep learning method for detection of structural microcracks by brillouin scattering based distributed optical fiber sensors. *Smart Materials and Structures*, IOP Publishing, v. 29, n. 7, p. 075008, 2020. Citado na página 29.
- SONG, Y. et al. Online multi-parameter sensing and condition assessment technology for power cables: A review. *Electric Power Systems Research*, Elsevier, v. 210, p. 108140, 2022. Citado na página 21.
- 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 55.
- SOTO, M. A.; BOLOGNINI, G.; PASQUALE, F. D. Long-range simplex-coded botda sensor over 120km distance employing optical preamplification. *Optics letters*, Optica Publishing Group, v. 36, n. 2, p. 232–234, 2011. Citado na página 76.
- 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 2 vezes nas páginas 40 e 56.
- SOTO, M. A.; RAMIREZ, J. A.; THÉVENAZ, L. Intensifying the response of distributed optical fibre sensors using 2d and 3d image restoration. *Nature communications*, Nature Publishing Group UK London, v. 7, n. 1, p. 10870, 2016. Citado na página 59.

SOTO, M. A. et al. Optimization of a dpp-botda sensor with 25 cm spatial resolution over 60 km standard single-mode fiber using simplex codes and optical pre-amplification. *Optics Express*, Optica Publishing Group, v. 20, n. 7, p. 6860–6869, 2012. Citado na página 76.

STAVELEY, C. Applications of optical fibre sensors to structural health monitoring, optimisation and life-cycle cost control for oil and gas infrastructures. Citado na página 24.

STENZEL, O. et al. *The physics of thin film optical spectra*. [S.l.]: Springer, 2015. Citado na página 113.

SU, J. et al. Double-parameters optical fiber sensor based on spherical structure and multimode fiber. *IEEE Photonics Technology Letters*, IEEE, v. 27, n. 4, p. 427–430, 2014. Citado na página 82.

SUN, H. et al. A hybrid fiber interferometer for simultaneous refractive index and temperature measurements based on fabry–perot/michelson interference. *IEEE Sensors Journal*, IEEE, v. 13, n. 5, p. 2039–2044, 2013. Citado na página 83.

SUN, H. et al. An optical fiber fabry–perot interferometer sensor for simultaneous measurement of relative humidity and temperature. *IEEE Sensors Journal*, IEEE, v. 15, n. 5, p. 2891–2897, 2014. Citado na página 78.

SUN, J. et al. Application of an artificial neural network for simultaneous measurement of bending curvature and temperature with long period fiber gratings. *Sensors and Actuators A: Physical*, Elsevier, v. 137, n. 2, p. 262–267, 2007. Citado na página 85.

TAN, X.-L. et al. Uv-curable polymer microhemisphere-based fiber-optic fabry–perot interferometer for simultaneous measurement of refractive index and temperature. *IEEE Photonics Journal*, IEEE, v. 6, n. 4, p. 1–8, 2014. Citado na página 86.

TAN, Y. et al. Temperature-insensitive humidity sensor based on a silica fiber taper interferometer. *IEEE Photonics Technology Letters*, IEEE, v. 25, n. 22, p. 2201–2204, 2013. Citado na página 78.

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*, American Institute of Physics, v. 99, n. 20, p. 201110, 2011. Citado 2 vezes nas páginas 55 e 60.

TAO, S.; DONG, X.; LAI, B. A sensor for simultaneous measurement of displacement and temperature based on the fabry–pérot effect of a fiber bragg grating. *IEEE Sensors Journal*, IEEE, v. 17, n. 2, p. 261–266, 2016. Citado na página 85.

TAVERNER, D.; NORTON, D. A. *Brillouin distributed temperature sensing calibrated in-situ with Raman distributed temperature sensing*. [S.l.]: Google Patents, 2009. US Patent 7,529,434. Citado na página 77.

TIAN, K. et al. Simultaneous measurement of displacement and temperature based on a balloon-shaped bent smf structure incorporating an lpg. *Journal of lightwave technology*, IEEE, v. 36, n. 20, p. 4960–4966, 2018. Citado na página 85.

TONG, Z. et al. Simultaneous measurement based on composite interference structure. *IEEE Photonics Technology Letters*, IEEE, v. 26, n. 13, p. 1310–1313, 2014. Citado na página 82.

UDD, E.; SPILLMAN-JR, W. B. *Fiber optic sensors: an introduction for engineers and scientists*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2011. Citado 2 vezes nas páginas 46 e 51.

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 5 vezes nas páginas 19, 46, 47, 48 e 53.

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, 2011. Citado na página 75.

URRUTIA, A. et al. Simultaneous measurement of humidity and temperature based on a partially coated optical fiber long period grating. *Sensors and Actuators B: Chemical*, Elsevier, v. 227, p. 135–141, 2016. Citado 2 vezes nas páginas 78 e 79.

VELÁZQUEZ-GONZÁLEZ, J. S. et al. Simultaneous measurement of refractive index and temperature using a spr-based fiber optic sensor. *Sensors and Actuators B: Chemical*, Elsevier, v. 242, p. 912–920, 2017. Citado na página 79.

VENKETESWARAN, A. et al. Recent advances in machine learning for fiber optic sensor applications. *Advanced Intelligent Systems*, Wiley Online Library, v. 4, n. 1, p. 2100067, 2022. Citado na página 20.

WADE, S. et al. A fibre optic corrosion fuse sensor using stressed metal-coated optical fibres. *Sensors and Actuators B: Chemical*, Elsevier, v. 131, n. 2, p. 602–608, 2008. Citado na página 68.

WAKAMI, T.; TANAKA, S. 1.55-um 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. 134–137. Citado na página 54.

WANG, B. et al. Simultaneous temperature and strain measurement using deep neural networks for botda sensing system. In: OPTICAL SOCIETY OF AMERICA. *Optical Fiber Communication Conference*. [S.l.], 2018. p. Th2A–66. Citado 6 vezes nas páginas 21, 22, 75, 129, 130 e 131.

WANG, D. et al. Remote simultaneous measurement of liquid temperature and refractive index using fiber-optic spontaneous raman scattering. *IEEE Sensors Journal*, IEEE, v. 19, n. 22, p. 10513–10518, 2019. Citado 3 vezes nas páginas 44, 45 e 131.

WANG, D. et al. Optical fiber liquid refractive index sensor based on fresnel reflection of anti-stokes light. *Sensors and Actuators A: Physical*, Elsevier, v. 279, p. 140–144, 2018. Citado 5 vezes nas páginas 9, 45, 86, 87 e 88.

WANG, D. et al. Quasi-distributed optical fiber sensor for liquid-level measurement. *IEEE Photonics Journal*, IEEE, v. 9, n. 6, p. 1–7, 2017. Citado na página 51.

WANG, H. et al. Simultaneous measurement of refractive index and temperature based on asymmetric structures modal interference. *Optics Communications*, Elsevier, v. 364, p. 191–194, 2016. Citado 2 vezes nas páginas 44 e 82.

WANG, H. et al. Rdts noise reduction: A fast method study based on signal waveform type. *Optical Fiber Technology*, Elsevier, v. 65, p. 102594, 2021. Citado na página 59.

WANG, M. et al. Few-mode fiber based raman distributed temperature sensing. *Optics Express*, Optica Publishing Group, v. 25, n. 5, p. 4907–4916, 2017. Citado na página 59.

WANG, T.; WANG, M. Fabry–pérot fiber sensor for simultaneous measurement of refractive index and temperature based on an in-fiber ellipsoidal cavity. *IEEE Photonics Technology Letters*, IEEE, v. 24, n. 19, p. 1733–1736, 2012. Citado na página 86.

WANG, X.; LIU, T.; WANG, H. Research on noise reduction approach of raman-based distributed temperature sensor based on nonlinear filter. *Open Journal of Applied Sciences*, Scientific Research Publishing, v. 9, n. 8, p. 631–639, 2019. Citado na página 59.

WANG, Y. et al. A quasi-distributed sensing network with time-division-multiplexed fiber bragg gratings. *IEEE Photonics Technology Letters*, IEEE, v. 23, n. 2, p. 70–72, 2010. Citado na página 51.

WANG, Z. L. et al. Spatial resolution improvement of distributed raman temperature measurement system. *IEEE Sensors Journal*, IEEE, v. 13, n. 11, p. 4271–4278, 2013. Citado na página 60.

WARREN-SMITH, S. C. et al. Distributed fluorescence sensing using exposed core microstructured optical fiber. *IEEE Photonics Technology Letters*, IEEE, v. 22, n. 18, p. 1385–1387, 2010. Citado na página 50.

WENG, S. et al. Double-side polished fiber spr sensor for simultaneous temperature and refractive index measurement. *IEEE Photonics Technology Letters*, IEEE, v. 28, n. 18, p. 1916–1919, 2016. Nenhuma citação no texto.

WILLIAMS, K. R.; GUPTA, K.; WASILIK, M. Etch rates for micromachining processing-part ii. *Journal of microelectromechanical systems*, IEEE, v. 12, n. 6, p. 761–778, 2003. Citado na página 123.

WONG, A. C. et al. Composite structure distributed bragg reflector fiber laser for simultaneous two-parameter sensing. *IEEE Photonics Technology Letters*, IEEE, v. 22, n. 19, p. 1464–1466, 2010. Citado 2 vezes nas páginas 86 e 87.

WONG, A. C. et al. Simultaneous two-parameter sensing using a single tilted moiré fiber bragg grating with discrete wavelet transform technique. *IEEE Photonics Technology Letters*, IEEE, v. 22, n. 21, p. 1574–1576, 2010. Citado na página 84.

WRIGHT, R. F. et al. Metallic coating enabled optical fiber sensor for distributed corrosion monitoring. In: SPIE. *Fiber Optic Sensors and Applications XVII*. [S.l.], 2021. v. 11739, p. 44–54. Citado 2 vezes nas páginas 71 e 72.

WU, H. et al. A temperature and strain sensor based on a cascade of double fiber bragg grating. *Measurement Science and Technology*, IOP Publishing, v. 30, n. 6, p. 065104, 2019. Citado 2 vezes nas páginas 77 e 78.

WU, H. et al. Performance enhancement of rotdr using deep convolutional neural networks. In: OPTICA PUBLISHING GROUP. *Optical Fiber Sensors*. [S.l.], 2018. p. TuE16. Citado na página 60.

WU, Q. et al. Fibre heterostructure for simultaneous strain and temperature measurement. *Electronics letters*, IET, v. 47, n. 12, p. 713–714, 2011. Citado 2 vezes nas páginas 75 e 83.

WYSOCKI, J. A. *Metallic clad fiber optical waveguide*. [S.l.]: Google Patents, 1983. US Patent 4,407,561. Citado na página 102.

WYSOCKI, J. A.; BLAIR, G. R.; VINCE, M. R. *Multiply coated metallic clad fiber optical waveguide*. [S.l.]: Google Patents, 1983. US Patent 4,418,984. Citado na página 102.

XI, J.-Q. et al. Optical thin-film materials with low refractive index for broadband elimination of fresnel reflection. *Nature photonics*, Nature Publishing Group UK London, v. 1, n. 3, p. 176–179, 2007. Citado na página 44.

XIANG, Y. et al. Quasi-distributed dual-parameter optical fiber sensor based on cascaded microfiber fabry-perot interferometers. *IEEE Photonics Journal*, IEEE, v. 10, n. 2, p. 1–9, 2018. Citado na página 85.

XIANG, Y. et al. Distributed dual-parameter optical fiber sensor based on cascaded microfiber fabry-pérot interferometers. In: IEEE. *2017 25th Optical Fiber Sensors Conference (OFS)*. [S.l.], 2017. p. 1–4. Citado na página 85.

XIN, C.; GUAN, M. The sensitivity of distributed temperature sensor system based on raman scattering under cooling down, loading and magnetic field. *Cryogenics*, Elsevier, v. 100, p. 36–40, 2019. Citado 3 vezes nas páginas 8, 57 e 58.

XINGLING, P.; HUA, Z.; YULONG, L. Modeling and simulation of macrobending losses in metal-coated single-mode fibers. *Journal of Modern Optics*, Taylor & Francis, v. 62, n. 16, p. 1297–1302, 2015. Citado na página 98.

XIONG, M. et al. Simultaneous refractive index and temperature measurement based on mach-zehnder interferometer concatenating two bi-tapers and a long-period grating. *IEEE Sensors Journal*, IEEE, v. 16, n. 11, p. 4295–4299, 2016. Citado 2 vezes nas páginas 82 e 85.

XIONG, R. et al. Simultaneous measurement of refractive index and temperature based on modal interference. *IEEE Sensors Journal*, IEEE, v. 14, n. 8, p. 2524–2528, 2014. Citado 3 vezes nas páginas 9, 81 e 82.

XU, B. et al. Fiber fabry-pérot interferometer for measurement of gas pressure and temperature. *Journal of Lightwave Technology*, IEEE, v. 34, n. 21, p. 4920–4925, 2016. Citado na página 80.

XU, J. et al. Simultaneous force and temperature measurement using long-period grating written on the joint of a microstructured optical fiber and a single mode fiber. *Applied optics*, Optica Publishing Group, v. 49, n. 3, p. 492–496, 2010. Citado na página 85.

XU, W.; HUANG, X. G.; PAN, J. S. Simple fiber-optic refractive index sensor based on fresnel reflection and optical switch. *IEEE Sensors Journal*, IEEE, v. 13, n. 5, p. 1571–1574, 2012. Citado na página 44.

XU, Y. et al. Optical refractive index sensors with plasmonic and photonic structures: promising and inconvenient truth. *Advanced Optical Materials*, Wiley Online Library, v. 7, n. 9, p. 1801433, 2019. Citado na página 44.

XUE, H. et al. Single-mode-multimode fiber structure based sensor for simultaneous measurement of refractive index and temperature. *IEEE Sensors Journal*, IEEE, v. 13, n. 11, p. 4220–4223, 2013. Citado 2 vezes nas páginas 86 e 87.

YAN, H.; LIU, Y.; GU, T. Fabrication and experiment of a fbg strain sensor in high temperature environment. In: IEEE. *2017 16th International Conference on Optical Communications and Networks (ICOON)*. [S.l.], 2017. p. 1–3. Citado na página 77.

YAN, J. et al. Simultaneous measurement of refractive index and temperature by using dual long-period gratings with an etching process. *IEEE Sensors Journal*, IEEE, v. 7, n. 9, p. 1360–1361, 2007. Citado 2 vezes nas páginas 84 e 85.

YANG, G. et al. Enhanced raman distributed temperature sensor using a high raman gain fiber. *IEEE Sensors Journal*, IEEE, v. 21, n. 24, p. 27518–27525, 2021. Citado na página 62.

YANG, H. Z. et al. Cladless few mode fiber grating sensor for simultaneous refractive index and temperature measurement. *Sensors and Actuators A: Physical*, Elsevier, v. 228, p. 62–68, 2015. Citado na página 84.

YANG, M.; WANG, D.; LIAO, C. Fiber bragg grating with micro-holes for simultaneous and independent refractive index and temperature sensing. *IEEE Photonics Technology Letters*, IEEE, v. 23, n. 20, p. 1511–1513, 2011. Citado na página 86.

YAO, Q. et al. Simultaneous measurement of refractive index and temperature based on a core-offset mach–zehnder interferometer combined with a fiber bragg grating. *Sensors and Actuators A: Physical*, Elsevier, v. 209, p. 73–77, 2014. Citado 2 vezes nas páginas 83 e 85.

YIN, G. et al. Simultaneous refractive index and temperature measurement with lpfg and liquid-filled pcf. *IEEE Photonics Technology Letters*, IEEE, v. 27, n. 4, p. 375–378, 2014. Citado 2 vezes nas páginas 85 e 86.

YIN, J. et al. Batch-producible fiber-optic fabry–pérot sensor for simultaneous pressure and temperature sensing. *IEEE Photonics Technology Letters*, IEEE, v. 26, n. 20, p. 2070–2073, 2014. Citado na página 80.

YIN, S. S.; RUFFIN, P. *Fiber optic sensors*. [S.l.]: Wiley Online Library, 2002. Citado 2 vezes nas páginas 34 e 48.

YU, L.; LIU, Y.; Z, Y. D. Brillouin scattering distributed optical fiber sensor. *Laser & Optoelectronics Progress*, v. 43, n. 4, p. 24–28, 2006. Citado na página 29.

YU, Y. et al. An in-line fiber-optic modal interferometer for simultaneous measurement of twist and ambient temperature. *Sensing and Bio-Sensing Research*, Elsevier, v. 2, p. 38–42, 2014. Citado na página 85.

YU, Y. et al. Fiber bragg grating sensor for simultaneous measurement of displacement and temperature. *Optics letters*, Optica Publishing Group, v. 25, n. 16, p. 1141–1143, 2000. Citado na página 85.

YUNUS, W. M. M. Temperature dependence of refractive index and absorption of nacl, mgcl 2, and na 2 so 4 solutions as major components in natural seawater. *Applied optics*, Optica Publishing Group, v. 31, n. 16, p. 2963–2964, 1992. Citado na página 22.

ZAGHLOUL, M. A. et al. Discrimination of temperature and strain in brillouin optical time domain analysis using a multicore optical fiber. *Sensors*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 18, n. 4, p. 1176, 2018. Citado na página 75.

- ZHANG, A. P. et al. Sandwiched long-period gratings for simultaneous measurement of refractive index and temperature. *IEEE Photonics Technology Letters*, IEEE, v. 17, n. 11, p. 2397–2399, 2005. Citado 2 vezes nas páginas 79 e 83.
- ZHANG, C.; JIN, Z. Rds-based two-dimensional temperature monitoring with high positioning accuracy using grid distribution. *Sensors*, MDPI, v. 19, n. 22, p. 4993, 2019. Citado na página 60.
- ZHANG, C. et al. Multipoint refractive index and temperature fiber optic sensor based on cascaded no core fiber-fiber bragg grating structures. *Optical Engineering*, Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, v. 56, n. 2, p. 027102–027102, 2017. Citado na página 85.
- ZHANG, C. et al. Optical fibre temperature and humidity sensor. *Electronics Letters*, IET, v. 46, n. 9, p. 643–644, 2010. Citado na página 78.
- ZHANG, J. et al. Simultaneous measurement of refractive index and temperature using a michelson fiber interferometer with a hi-bi fiber probe. *IEEE Sensors Journal*, IEEE, v. 13, n. 6, p. 2061–2065, 2013. Citado na página 86.
- ZHANG, J. et al. Microfiber fabry–perot interferometer for dual-parameter sensing. *Journal of lightwave technology*, IEEE, v. 31, n. 10, p. 1608–1615, 2013. Citado na página 85.
- ZHANG, L. et al. Improving spatial resolution in fiber raman distributed temperature sensor by using deconvolution algorithm. *Chinese Optics Letters*, Chinese Optical Society, v. 7, n. 7, p. 560–563, 2009. Citado 2 vezes nas páginas 59 e 60.
- ZHANG, L. et al. Simultaneous refractive index and temperature sensing with precise sensing location. *IEEE Photonics Technology Letters*, IEEE, v. 28, n. 8, p. 891–894, 2016. Citado na página 82.
- ZHANG, N. et al. Optical sensor for steel corrosion monitoring based on etched fiber bragg grating sputtered with iron film. *IEEE Sensors Journal*, IEEE, v. 15, n. 6, p. 3551–3556, 2015. Citado 2 vezes nas páginas 69 e 70.
- ZHANG, W. et al. Fbg-type sensor for simultaneous measurement of force (or displacement) and temperature based on bilateral cantilever beam. *IEEE Photonics Technology Letters*, IEEE, v. 13, n. 12, p. 1340–1342, 2001. Citado na página 85.
- ZHANG, Y. et al. Simultaneous measurement of temperature and pressure with cascaded extrinsic fabry–perot interferometer and intrinsic fabry–perot interferometer sensors. *Optical Engineering*, Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, v. 53, n. 6, p. 067101–067101, 2014. Citado na página 80.
- ZHANG, Z. et al. High-performance raman distributed temperature sensing powered by deep learning. *Journal of Lightwave Technology*, IEEE, v. 39, n. 2, p. 654–659, 2020. Citado 3 vezes nas páginas 55, 59 e 60.
- ZHANG, Z.-x. et al. The long range distributed fiber raman photon temperature sensor. *Optoelectronics Letters*, Springer, v. 3, p. 404–405, 2007. Citado na página 63.
- ZHAO, C.-L. et al. Simultaneous temperature and refractive index measurements using a 3 slanted multimode fiber bragg grating. *Journal of lightwave technology*, IEEE, v. 24, n. 2, p. 879, 2006. Citado 2 vezes nas páginas 79 e 84.

ZHAO, J.-R. et al. High-resolution and temperature-insensitive fiber optic refractive index sensor based on fresnel reflection modulated by fabry-perot interference. *Journal of lightwave technology*, IEEE, v. 28, n. 19, p. 2799–2803, 2010. Citado na página 44.

ZHAO, R.-a. et al. Polarization-maintaining fiber sensor for simultaneous measurement of the temperature and refractive index. *Optical Engineering*, Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, v. 56, n. 5, p. 057113–057113, 2017. Citado na página 82.

ZHAO, Y.; CAI, L.; LI, X.-G. High sensitive modal interferometer for temperature and refractive index measurement. *IEEE Photonics Technology Letters*, IEEE, v. 27, n. 12, p. 1341–1344, 2015. Citado na página 86.

ZHAO, Y.; CAI, L.; LI, X.-g. In-fiber modal interferometer for simultaneous measurement of curvature and temperature based on hollow core fiber. *Optics & Laser Technology*, Elsevier, v. 92, p. 138–141, 2017. Nenhuma citação no texto.

ZHAO, Y. et al. Measurement of ri and temperature using composite interferometer with hollow-core fiber and photonic crystal fiber. *IEEE transactions on instrumentation and measurement*, IEEE, v. 65, n. 11, p. 2631–2636, 2016. Citado 2 vezes nas páginas 83 e 84.

ZHOU, W. et al. A novel fbg sensing head geometry for strain-temperature discrimination. In: IEEE. *2009 Asia Communications and Photonics conference and Exhibition (ACP)*. [S.l.], 2009. v. 2009, p. 1–6. Citado na página 75.

ZHOU, X. et al. Chaos raman optical time-domain reflectometry for millimeter-level spatial resolution temperature sensing. *Journal of Lightwave Technology*, IEEE, v. 39, n. 23, p. 7529–7538, 2021. Citado na página 61.

ZHU, F. et al. D-shaped optic fiber temperature and refractive index sensor assisted by tilted fiber bragg grating and pdms film. *Sensors and Actuators A: Physical*, Elsevier, v. 346, p. 113870, 2022. Citado na página 84.

ZHU, P. et al. Distributed modular temperature-strain sensor based on optical fiber embedded in laminated composites. *Composites Part B: Engineering*, Elsevier, v. 168, p. 267–273, 2019. Citado na página 77.

ZHU, T.; RAO, Y.-J.; MO, Q.-J. Simultaneous measurement of refractive index and temperature using a single ultralong-period fiber grating. *IEEE Photonics Technology Letters*, IEEE, v. 17, n. 12, p. 2700–2702, 2005. Citado 2 vezes nas páginas 84 e 85.

ZOU, W.; HE, Z.; HOTATE, K. Demonstration of brillouin distributed discrimination of strain and temperature using a polarization-maintaining optical fiber. *IEEE Photonics Technology Letters*, IEEE, v. 22, n. 8, p. 526–528, 2010. Citado na página 75.

ZRELLI, A. Simultaneous monitoring of temperature, pressure, and strain through brillouin sensors and a hybrid botda/fbg for disasters detection systems. *IET Communications*, IET, v. 13, n. 18, p. 3012–3019, 2019. Citado na página 75.

APÊNDICE A - LISTA DE PUBLICAÇÕES

A.1 ARTIGOS PUBLICADOS EM PERIÓDICOS

- M. S. Peixoto e Silva, H. P. Alves, H. J. B. Oliveira, L. H. V. Leão, J. F. Nascimento and J. F. Martins-Filho, "Refractive Index and Corrosion Simultaneous Monitoring using Raman Anti-Stokes Reflectometric Optical Fiber Sensor". *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 72, pp. 1-8, Art n. 7003908, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIM.2023.3277928>.
- M. S. Peixoto e Silva, T. H. Barros, H. P. Alves, J. F. Nascimento and J. F. Martins-Filho, "Evaluation of fiber optic Raman scattering distributed temperature sensor between−196 and 400° C". *IEEE Sensors Journal*, v. 21, n. 2, pp. 1527-1533, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1109/JSEN.2020.3016322>.
- M. S. Peixoto e Silva, H. P. Alves, J. F. Nascimento and J. F. Martins-Filho, "Impact of pulse width on the sensitivity and range of a Raman-based distributed fiberoptic temperature sensor". *tJournal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications* v. 17, n. 4, p. 539-551, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1590/2179-10742018v17i41542>.

A.2 ARTIGOS PUBLICADOS EM PERIÓDICOS EM COLABORAÇÃO COM OUTROS PROJETOS

- H. J. B. de Oliveira, A. A. D. da Silva, M. S. P. e Silva, H. P. Alves, J. F. do Nascimento, J. F. Martins-Filho, "Refractive Index Sensors Based on Cascaded Multimode Interference Hetero-core Optical Fibers". *Applied Optics*, v. 62, n. 16, p. E16-E23, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1364/AO.480299>.
- H. P. Alves, T. H. C. de Barros, D. L. S. , Nascimento, M. S. Peixoto e Silva, J. F do Nascimento, E. Fontana, and J. F. Martins-Filho, "Influence of surface roughness on the sensitivity of a D-shaped optical fiber-based refractive index sensor". *Sensors and Actuators A: Physical*, v. 344, p. 113702, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sna.2022.113702>.

A.3 ARTIGOS PUBLICADOS EM CONFERÊNCIAS NACIONAIS

- M. S. P. e Silva, H. P. Alves, H. J. B. de Oliveira, L. H. Vilela-Leão, J. F. do Nascimento, e J. F. Martins-Filho. "Sensor Distribuído Baseado Em Espelhamento Raman Para Monitoramento Simultâneo de Temperatura, Índice de Refração e Corrosão". *20º Simpósio Brasileiro de Micro-Ondas e Optoeletrônica*. 2022.
- M. S. P. e Silva, H. P. Alves, H. J. B. de Oliveira, L. H. Vilela-Leão, J. F. do Nascimento e J. F. Martins-Filho. "Impacto da Largura de Pulso na Sensibilidade do Sensor Distribuído de Temperatura à Fibras Óptica Baseado em Espalhamento Raman". In: *MOMAG 2020 - 18º SBMO - Simpósio Brasileiro de Micro-ondas e Optoeletrônica e 13º CBMag - Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo*, Sata Rita do Sapucaí - MG. Anais do MOMAG 2018, Vale da Eletrônica.

A.4 ARTIGOS PUBLICADOS EM CONFERÊNCIAS INTERNACIONAIS EM COLABORAÇÃO COM OUTROS PROJETOS

- A. S. R da Silva, J. F. Martins- Filho, M. J C. Moura, M. S. Peixoto e Silva, R. V. Azevedo, "Sensores Raman Distribuídos de Temperatura à Fibra Óptica para Poço de Petróleo - Análise de Confiabilidade e Testes Acelerados de Vida". In: *Rio Oil & Gas Expo and Conf*, Technical Paper, v. 20, n. 79, 2022, ISSN 2525-7579, DOI: <https://doi.org/10.48072/2525-7579.rog.2022.079>.

A.5 ARTIGOS PUBLICADOS EM CONFERÊNCIAS NACIONAIS EM COLABORAÇÃO COM OUTROS PROJETOS

- , T. H. C. de Barros, L. S. C. Miranda, H. P. Alves, M. S. P. e Silva, e J. F. Martins-Filho, "Sensor Digital Multiponto a Fibra Óptica para Detecção de Óleo". In: *20º Simpósio Brasileiro de Micro-Ondas e Optoeletrônica*. 2022
- H. J. B. de Oliveira, A. A. Dias da Silva, M. S. P. e Silva, J. F. do Nascimento, J. F. Martins-Filho, "Sensor de Índice de Refração Baseado em Fibras Ópticas Heteronúcleo em Cascata Multiplexado em Comprimento de Onda". *20º Simpósio Brasileiro de Micro-Ondas e Optoeletrônica*. 2022.
- H. P. Alves, D. L. S. Nascimento, M. S. Peixoto e Silva, J. F. do Nascimento, E. Fontana, e J. F. Martins-Filho, "Influência da Rugosidade de Superfície na Sensibilidade de um Sensor de Índice de Refração Baseado em Fibra Óptica com Perfil D". In: *MOMAG 2020 - 19º SBMO - Simpósio Brasileiro de Micro-ondas e Optoeletrônica e 14º CBMag - Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo*, 2020, Niterói. Anais do MOMAG 2020.

- H. P. ALVES, M. S. Peixoto e Silva, J. Nascimento, E. Fontana, e J. F. Martins-Filho, "Processo de Fabricação de Fibra Óptica Perfil D para aplicação em Sensores Ópticos". In: *MOMAG 2018*, Santa Rita do Sacupá. Anais do MOMAG 2018 - Vale da Eletrônica, 2018.