

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



**JEHAN FONSÊCA DO NASCIMENTO**

**SENSOR MULTIPONTO DE CORROSÃO  
BASEADO EM REFLECTOMETRIA  
AMPLIFICADA EM FIBRA ÓPTICA**

**VIRTUS IMPAVIDA**

RECIFE, FEVEREIRO DE 2013.

**JEHAN FONSÊCA DO NASCIMENTO**

**SENSOR MULTIPONTO DE CORROSÃO  
BASEADO EM REFLECTOMETRIA  
AMPLIFICADA 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**

**ORIENTADOR: PROF. JOAQUIM FERREIRA MARTINS-FILHO, PHD.**

Recife, Fevereiro de 2013.

Catálogo na fonte  
Bibliotecária: Rosineide Mesquita Gonçalves Luz / CRB4-1361 (BCTG)

N244s Nascimento, Jehan Fônsêca dô.  
Sensor Multiponto de Corrosão baseado em Reflectometria Amplificada em Fibra Óptica / Jehan Fônsêca do Nascimento – Recife: O Autor, 2013.  
99f. il., figs., gráfs., tabs.

Orientador: Prof. Joaquim Ferreira Martins-Filho. PHD.

Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG.  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, 2013.  
Inclui Referências e Apêndice.

1. Engenharia Elétrica. 2. Corrosão. 3. Fibra Óptica. 4. Laser. 5. Sensor. I. Martins-Filho, Joaquim Ferreira (Orientador). II. Título.

621.3 CDD (22.ed) UFPE/BCTG-2013 / 030



Universidade Federal de Pernambuco  
*Pós-Graduação em Engenharia Elétrica*

PARECER DA COMISSÃO EXAMINADORA DE DEFESA DE  
TESE DE DOUTORADO

# JEHAN FONSÊCA DO NASCIMENTO

TÍTULO

**“SENSOR MULTIPONTO DE CORROSÃO BASEADO  
EM REFLECTOMETRIA AMPLIFICADA EM FIBRA ÓPTICA”**

A comissão examinadora composta pelos professores: JOAQUIM FERREIRA MARTINS FILHO, DES/UFPE; EDUARDO FONTANA, DES/UFPE; SERGIO CAMPELLO OLIVEIRA, POLI/UFPE; SEVERINO LEOPOLDINO URTIGA FILHO, DEMEC/UFPE e JOÃO BATISTA ROSOLEM, CPqD, sob a presidência do primeiro, consideram o candidato **JEHAN FONSÊCA DO NASCIMENTO APROVADO.**

Recife, 26 de fevereiro de 2013.

---

**CECÍLIO JOSÉ LINS PIMENTEL**  
Coordenador do PPGEE

---

**JOAQUIM FERREIRA MARTINS FILHO**  
Orientador e Membro Titular Interno

---

**SERGIO CAMPELLO OLIVEIRA**  
Membro Titular Externo

---

**EDUARDO FONTANA**  
Membro Titular Interno

---

**SEVERINO LEOPOLDINO URTIGA FILHO**  
Membro Titular Externo

---

**JOÃO BATISTA ROSOLEM**  
Membro Titular Externo

# AGRADECIMENTOS

A Deus por permitir a realização desta tese.

Ao Professor Joaquim F. Martins Filho por me aceitar no seu grupo de pesquisa e também por sua participação ativa na minha formação de pesquisador como seu aluno nas disciplinas e na pesquisa.

Ao professor Eduardo Fontana por participar da minha formação e também pelos valorosos conselhos que ajudaram na construção desta tese.

Aos amigos do grupo de pesquisa: Aldsmyth, Elias, Helder, Isnaldo, Jairon, Marcionilo, Renan e Renato pelo apoio no trabalho e pelas conversas descontraídas.

À minha querida família: minha mãe Auxiliadora, minhas avós e a meu irmão Raphael pelo apoio oferecido.

À minha querida esposa Michellini Fonsêca, pelo apoio e compreensão nos momentos mais difíceis do doutorado.

Ao CNPq e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica pelo suporte financeiro.

JEHAN FONSECA DO NASCIMENTO

*Universidade Federal de Pernambuco*

*26 de Fevereiro de 2013*

Se você quiser ser bem sucedido, precisa ter dedicação total, buscar seu último limite e dar o melhor de si mesmo.

— **Ayrton Senna**

Resumo da Tese apresentada à UFPE como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Engenharia Elétrica

**SENSOR MULTIPONTO DE CORROSÃO BASEADO EM  
REFLECTOMETRIA AMPLIFICADA EM FIBRA  
ÓPTICA**

**Jehan Fonsêca do Nascimento**

Fevereiro/2013

**Orientador:** Prof. Joaquim Ferreira Martins-Filho, PhD.

**Área de Concentração:** Fotônica

**Palavras-chaves:** amplificação, corrosão, fibra óptica, laser, sensor.

**Número de páginas:** 99

Esta tese apresenta dois esquemas de monitoramento de corrosão em metal à base de fibra óptica usando a técnica de reflectometria óptica amplificada no domínio do tempo e também apresenta resultados experimentais de um estudo sobre os efeitos da rugosidade de superfície no filme metálico sob o sinal óptico durante o processo de corrosão. O sistema sensor amplificado é multiponto, auto-referenciado e pode medir taxa de corrosão a vários quilômetros do equipamento OTDR. O primeiro esquema usa uma fibra dopada com Érbio com bombeamento remoto e é utilizado para avaliar o aumento do alcance do sistema quando comparado com o sistema não-amplificado. O segundo esquema usa outro EDFA próximo ao OTDR como reforço para o sinal óptico gerado por ele. Além disso, esse sistema é usado para as medidas de corrosão e também para avaliação da sensibilidade do sistema às variações de ganho do amplificador. Os resultados experimentais obtidos em condições laboratoriais controladas mostram as vantagens do sistema de amplificação, em termos do seu longo alcance, melhor resolução espacial e imunidade a variações de ganho. Nos resultados experimentais obtidos pelo sensor de corrosão foram observados efeitos ópticos que sugerem a influência da rugosidade do filme metálico na reflectância da luz, resultante do processo de corrosão. Resultados experimentais obtidos através de um aparato experimental que utiliza diferentes comprimentos de onda da luz e também diferentes meios externos indicam que ocorrem efeitos de espalhamento de luz e ressonância de plásmons de superfície.

Abstract of Thesis presented to UFPE as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor in Electrical Engineering

## **MULTIPOINT CORROSION SENSOR BASED IN AMPLIFIED REFLECTOMETRY ON OPTICAL FIBER**

**Jehan Fonsêca do Nascimento**

February/2013

**Supervisor:** Prof. Joaquim Ferreira Martins-Filho, PhD.

**Area of Concentration:** Photonics

**Keywords:** amplification, corrosion, optical fiber, laser, sensors.

**Number of pages:** 99

This thesis presents two schemes of corrosion on metal monitoring using the amplified optical time domain reflectometry technique and it also shows experimental results of a study on the effects of surface roughness of the metal film on the optical signal during the corrosion process. The amplified sensor system is multipoint, self-referenced and can measure the corrosion rate at several kilometers from the OTDR equipment. The first scheme uses a remotely pumped Erbium doped fiber amplifier and used to assess the improvement of the range of the system when compared to the non-amplified system. The second scheme uses another EDFA, near the OTDR, as a reinforcement for the optical signal. Furthermore, this system is used for measurements of the corrosion and also for assessing the sensitivity of the system to variations in amplifier gain. The experimental results obtained under controlled laboratory conditions show the advantages of the amplified system in terms of its longer range. better spatial resolution and immunity to gain variations. In the experimental results obtained of the corrosion sensor, some effects were observed suggesting the influence of the roughness of the metal film on the light reflectance. Experimental results obtained using a experimental apparatus that uses different wavelengths of light, and also different external media indicate that there are effects of light scattering and surface plasmon resonance.



# LISTA DE SIGLAS

<b>Sigla</b>	<b>Descrição</b>	<b>Significado</b>
AFM	<i>Atomic Force Microscopy</i>	Microscopia de força atômica
ASE	<i>Amplified Spontaneous Emission</i>	Emissão espontânea amplificada
C-OTDR	<i>Correlation Optical Time-Domain Reflectometry</i>	Reflectometria óptica no domínio do tempo de correlação
CO-OTDR	<i>Coherent Optical Time-Domain Reflectometry</i>	Reflectometria óptica no domínio do tempo coerente
CTF	-	Corrosão sob tensão fraturante
EDFA	<i>Erbium Doped Fiber Amplifier</i>	Amplificador à fibra dopada com Érbio
EDF	<i>Erbium Doped Fiber</i>	Fibra dopada com Érbio
EDS	<i>Energy Dispersive Spectroscopy</i>	Espectroscopia de dispersão de energia
FWHM	<i>Full Width at Half Maximum</i>	Largura de banda a meia altura
OFDR	<i>Optical Frequency-Domain Reflectometry</i>	Reflectometria óptica no domínio da frequência
OTDR	<i>Optical Time-Domain Reflectometry</i>	Reflectometria óptica no domínio do tempo
OTDR	<i>Optical Time-Domain Reflectometer</i>	Reflectômetro óptico no domínio do tempo
OSA	<i>Optical Spectrum Analyser</i>	Analisador de espectro óptico
pH	-	Potencial de hidrogênio
PO-OTDR	<i>Polarization Optical Time-Domain Reflectometry</i>	Reflectometria óptica no domínio do tempo de polarização
WDM	<i>Wavelength-division multiplexing</i>	Multiplexidor de comprimento de onda
RPL	-	Resistência de polarização linear
SEM	<i>Scanning electron microscope</i>	Microscopia eletrônica de varredura
SP	<i>Surface Plasmon</i>	Plásmons de superfície
SPR	<i>Surface Plasmon Resonance</i>	Ressonância de plásmons de superfície

# LISTA DE SÍMBOLOS

Simbologia	Descrição
$A$	Atenuação total
$\kappa$	Coefficiente de extinção
$r_{i,i+1}$	Coefficiente de reflexão de Fresnell
$L$	Comprimento da fibra óptica
$\lambda$	Comprimento de onda
$D$	Distância onde ocorre a atenuação do sinal óptico
$E_0$	Energia do pulso
$E_L$	Energia do pulso ao longo da fibra óptica
$(dE)_e$	Energia retroespalhada na fibra óptica
$d$	Espessura do filme metálico
$\alpha_s$	Fator de atenuação da energia propagante
$n$	Índice de refração da luz
$n_g$	Índice de refração de grupo
$T_r$	Intervalo de tempo entre os pulsos
$T_p$	Largura do pulso
$k_2$	Número de ondas do meio 2
$\varepsilon_i$	Permissividade elétrica relativa dos meios
$P_{pt}$	Potência do pulso
$P_{rf}$	Potência por reflexão de Fresnell
$P_s$	Potência retroespalhada
$I_r$	Pulso refletido
$S$	Quantidade de energia espalhada na fibra óptica
$\Gamma$	Reflectância da luz
$\Gamma_s$	Reflectância do pulso

<b>Simbologia</b>	<b>Descrição</b>
$\Delta z$	Resolução espacial do pulso
$t$	Tempo de propagação do pulso na fibra óptica
$dL$	Variação da distância
$dE$	Variação da energia do pulso
$v_g$	Velocidade de grupo do pulso
$c$	Velocidade da luz no vácuo

# LISTA DE FIGURAS

1.1	Distribuição dos sensores de corrosão à base de fibra óptica nos dutos de poços de petróleo. As cabeças sensoras são representadas por pontos pretos ao longo dos dutos [18]. . . . .	19
2.1	Tipos de corrosão em metais[19]. . . . .	24
2.2	Sensor de RPL [24]. . . . .	27
2.3	Cupons de aço [25]. . . . .	29
2.4	Esquema do sensor de resistência elétrica e o próprio sensor de resistência elétrica [24]. . . . .	29
2.5	Esquema do reflectômetro no domínio do tempo usando linha de transmissão [26]. . . . .	30
3.1	Sensores à fibra óptica extrínsecos e/ou híbridos[35]. . . . .	35
3.2	Sensores à fibra óptica intrínsecos [35]. . . . .	36
3.3	Sensores à fibra óptica interferométrica [35]. . . . .	36
3.4	Sensor distribuído usando OTDR [44]. . . . .	38
3.5	Mecanismos de sensoriamento distribuído [44]. . . . .	38
3.6	Metodos de sensoriamento quase-distribuído [44]. . . . .	39
3.7	Esquema simplificado de um sensor quase-distribuído [44]. . . . .	39
3.8	Esquema de uma rede de sensores multiplexados [44]. . . . .	40
3.9	Diagrama em blocos de um sistema básico de medição usando o OTDR [54]. . . . .	42
3.10	Curva de potência em função da distância observada no OTDR [54]. . . . .	44
3.11	Esquema de funcionamento do sensor de corrosão através da perda por curvatura na fibra óptica [61]. . . . .	46
3.12	Perda por microcurvatura[61]. . . . .	46
3.13	Ilustração da rechadura provocada pela corrosão [62]. . . . .	47
3.14	Sensoriamento à fibra óptica por espectrometria [62]. . . . .	47
3.15	Sensor de corrosão usando técnicas óptica e eletroquímica [14]. . . . .	48
3.16	(a) Filme de Fe-C depositado na superfície lateral do núcleo da fibra óptica e (b) o aparato experimental para verificação do processo de corrosão do filme Fe-C [16]. . . . .	49
3.17	(a) Diagrama em bloco do sistema sensor e (b) o filme de Fe-C depositado na face clivada do núcleo da fibra óptica [12]. . . . .	50
3.18	Aparato experimental para medida da corrosão através da espectrometria [17]. . . . .	51
3.19	Sensor de pH à base de fibra óptica fixada numa peça metálica [63]. . . . .	52

3.20	Esquema do sensor de corrosão multiponto à base de fibra óptica monomodo [4]. . . . .	52
3.21	Princípio de funcionamento do sensor de corrosão de Wade [13]. . . . .	53
3.22	Esquema de instalação do sensor de corrosão para monitoramento das estruturas de Ferro dentro do concreto armado [64]. . . . .	53
4.1	Em (a), tem-se a evaporadora térmica da marca Variary. Já em (b), tem-se um conjunto de pontas depositadas com Al. . . . .	57
4.2	Esquemas de caracterização do ganho do EDFA (a) apenas o EDFA e (b) o ganho líquido. . . . .	59
4.3	Traço do OTDR para a configuração experimental da Figura 4.2 (a) usado para caracterizar o ganho do EDFA, para uma potência de bombeio de 23,2 mW. . . . .	60
4.4	Os gráficos do ganho em função da potência de bombeio:(a) Ganho bruto e (b) ganho líquido para diferentes larguras de pulso do OTDR. . . . .	61
4.5	Esquema do sensor multiponto (a) sem e (b) com amplificação. . . . .	63
4.6	Traços do OTDR do sistema sensor multiponto amplificado (linha vermelha) e não-amplificado (linha preta) para diferentes larguras de pulso (a) 10 ns, (b) 50 ns e (c) 100 ns. . . . .	64
4.7	Sistema sensor multiponto de corrosão (a) sem e (b) com amplificação. . . . .	66
4.8	Traços do OTDR (a) não amplificado e (b) amplificado do sistema sensor apresentado na Figura 4.7 para diferentes ganhos (17 dB e 20 dB). . . . .	67
4.9	Intensidade relativa do OTDR como função do tempo de corrosão do filme de Al para os seguintes casos: (a) sem ganho, (b) ganho de 17 dB e (c) ganho de 20 dB. . . . .	68
4.10	Intensidade relativa (B-A) para a corrosão do Al sob variações de ganho: (a) de 20 dB para 17 dB e (b) de 17 dB para 20 dB. . . . .	69
4.11	Intensidade relativa (B-A') para a corrosão do Al sob variações de ganho: (a) de 20 dB para 17 dB e (b) de 17 dB para 20 dB. . . . .	70
5.1	Ponta da fibra óptica metalizada com Al (a) sem e (b) com corrosão. . . . .	74
5.2	Aparato experimental para o estudo da corrosão em diferentes meios (água, ar e álcool isopropílico) e também para diferentes comprimentos de onda (980, 1320 e 1551 nm). . . . .	75
5.3	Processo de corrosão do filme de Al para cada comprimento de onda dos <i>lasers</i> em diferentes meios: (a) água (b) ar e (c) álcool isopropílico. . . . .	76
5.4	Potência refletida em função do tempo de corrosão em diferentes meios para cada comprimento de onda dos <i>lasers</i> : (a) 980 nm, (b) 1320 nm e (c) 1551 nm. . . . .	78
5.5	Potência refletida em função da espessura do Al em diferentes meios para cada comprimento de onda dos <i>lasers</i> : (a) 980 nm, (b) 1320 nm e (c) 1551 nm. . . . .	79
5.6	Diagrama esquemático do filme de Al de espessura $d$ depositado na face da fibra óptica [6]. . . . .	80
5.7	Traços teóricos e experimentais da reflectância em função da espessura do Al para diferentes meios e comprimentos de onda. . . . .	81

5.8	A posição do vale em função do índice de refração dos meios para cada comprimento de onda. . . . .	81
5.9	Ilustração dos efeitos ópticos na ponta metalizada ao longo do processo de corrosão. . . . .	82
5.10	Comparação entre teoria e experimento para os modelos teóricos para interface planar e interface rugosa [84]. . . . .	83
5.11	Aparato experimental para analisar o processo de corrosão do Al através da luz transmitida e refletida no filme de Al. . . . .	84
5.12	(a) Resultados da luz refletida e transmitida nas escalas em dB e linear e (b) da potência total nas escalas em dB e linear para o filme com 60 nm de espessura. . . . .	84
5.13	(a) Resultados da luz refletida e transmitida nas escalas em dB e linear e (b) da potência total nas escalas em dB e linear para o filme com 65 nm de espessura. . . . .	85

# LISTA DE TABELAS

2.1	Características dos sensores de corrosão não-ópticos. . . . .	32
3.1	Características dos sensores de corrosão à fibra óptica. . . . .	54
5.1	Parâmetros ópticos dos materiais[59,78-81]. . . . .	80

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>17</b>
1.1	Motivação . . . . .	18
1.2	Organização do trabalho . . . . .	19
<b>2</b>	<b>CORROSÃO</b>	<b>21</b>
2.1	Sobre a corrosão . . . . .	21
2.2	Tipos de corrosão . . . . .	22
2.3	Mecanismos de corrosão e proteção de metais à corrosão . . . . .	24
2.4	Sensores não-ópticos para monitoramento da corrosão em metais . . . . .	26
<b>3</b>	<b>SENSORES DE CORROSÃO À FIBRA ÓPTICA</b>	<b>33</b>
3.1	Sensores ópticos . . . . .	33
3.2	Sensores à fibra óptica . . . . .	34
3.2.1	Sensores à fibra óptica distribuídos . . . . .	37
3.2.2	Sensores à fibra óptica quase-distribuídos . . . . .	38
3.3	Reflectometria óptica . . . . .	40
3.3.1	Princípio da reflectometria óptica no domínio do tempo . . . . .	41
3.3.2	Interpretação dos resultados obtidos com o OTDR . . . . .	42
3.4	Aplicações de sensores de fibra óptica no monitoramento da corrosão em metais . . . . .	45
<b>4</b>	<b>SISTEMA OTDR AMPLIFICADO PARA MONITORAMENTO MULTIPONTO DE CORROSÃO</b>	<b>55</b>
4.1	Introdução . . . . .	55
4.2	Caracterização do sensor óptico amplificado . . . . .	58
4.2.1	Caracterização do ganho do EDFA usado no sistema sensor óptico . . . . .	58
4.2.2	Aumento da distância de monitoramento do sistema sensor óptico amplificado . . . . .	62
4.3	Medidas de corrosão com o sistema óptico amplificado . . . . .	65
4.4	Conclusões . . . . .	70
<b>5</b>	<b>INFLUÊNCIA DA RUGOSIDADE EM FIBRAS METALIZADAS SOB CORROSÃO</b>	<b>72</b>
5.1	Introdução . . . . .	72
5.2	Aparato experimental e resultados . . . . .	74
5.3	Conclusões . . . . .	85



<b>6 CONCLUSÃO E PERSPECTIVAS FUTURAS</b>	<b>87</b>
<b>6.1 Contribuições do trabalho</b> . . . . .	88
<b>6.2 Propostas para trabalhos futuros</b> . . . . .	88
 REFERÊNCIAS	 91
 Apêndice A LISTA DE PUBLICAÇÕES	 98
<b>A.1 Artigo publicado em periódico</b> . . . . .	98
<b>A.2 Artigo em fase de preparação para periódico</b> . . . . .	98
<b>A.3 Artigo publicado em conferência internacional</b> . . . . .	98
<b>A.4 Artigos publicados em conferências nacionais</b> . . . . .	98

# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO

**S**ensores à base de fibra óptica são usados para monitorar vários tipos de grandezas, tais como: temperatura, pressão, corrosão, umidade, poluição, corrente, tensão, campo elétrico, campo magnético entre outras [1–3]. As técnicas de monitoramento à base de fibras ópticas têm vantagens, como simplicidade, versatilidade, segurança, baixo peso e confiabilidade [4]. Além disso, as fibras ópticas podem transportar sinais de luz a grandes distâncias sem perda apreciável de potência. Sensores com base em fibras ópticas também podem ser utilizados em ambientes hostis, tais como no interior de máquinas elétricas, em áreas expostas a campos magnéticos fortes (transformadores de alta potência) e em locais de difícil acesso e sujeitas a altas temperaturas e pressão, como em oleodutos e poços de petróleo [5,6].

Esta tese contribui na caracterização de um sensor multiponto de corrosão que usa a técnica de reflectometria óptica amplificada. Este sistema é o primeiro sensor de corrosão à base de fibra óptica que envolve amplificação de sinal óptico e é capaz de monitorar a corrosão a longas distâncias do instrumento de detecção do sinal óptico refletido e também com melhor resolução espacial, quando comparado com o sistema sensor multiponto de corrosão proposto por Martins-Filho e colaboradores [4]. Além disso, a amplificação do sinal óptico não modifica a análise do processo de corrosão do metal e assim pode-se considerar um sistema auto-referenciado. Também foram feitas análises mais detalhadas nos resultados experimentais obtidos pelo sistema sensor de corrosão com o intuito de compreender os efeitos da corrosão no sinal óptico.

## 1.1 Motivação

Os dutos de poços de petróleo estão constantemente sujeitos ao processo de corrosão, seja ele devido ao ataque químico de ácidos e outras substâncias, ou devido à erosão provocada pela areia e detritos sólidos. A corrosão causa o afinamento das paredes e leva à formação de furos nos dutos, o que causa problemas operacionais (diminuição da produção) e ambientais (vazamentos). Por isso, muitos poços de petróleo e gás são construídos utilizando dois ou mais dutos concêntricos, o que eleva o custo de implantação dos poços, e torna a monitoração da corrosão ainda mais importante. Além disso, os procedimentos de manutenção preventiva requerem a interrupção da produção e são realizados sem que se saiba da sua real necessidade [7].

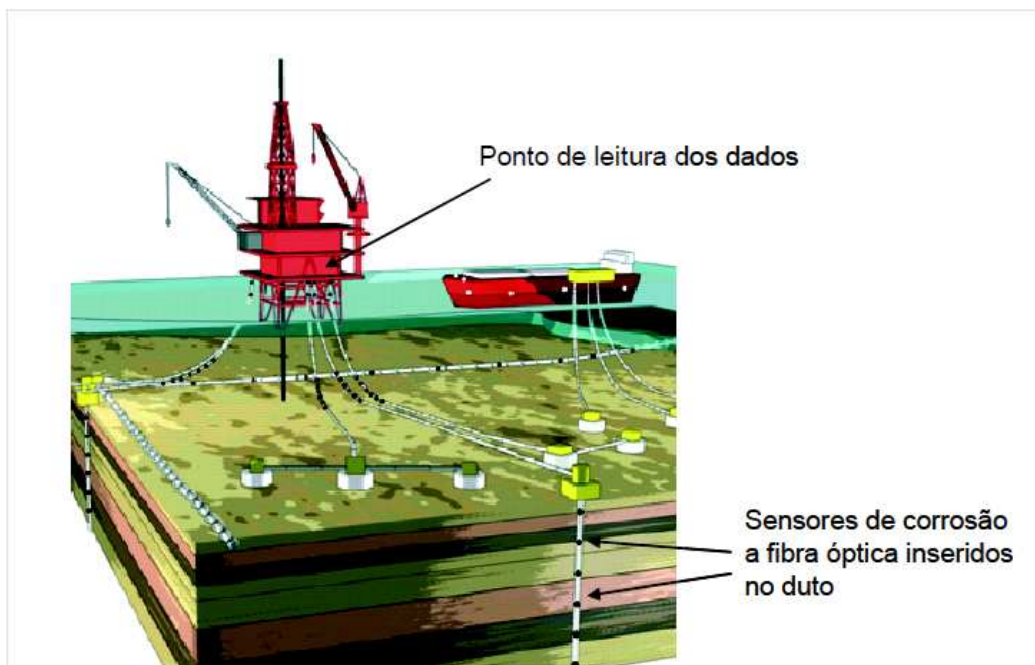
O custo anual dessa manutenção em poços profundos é estimado em alguns milhões de dólares [8]. Os métodos normalmente usados para a monitoração da corrosão são mecânicos, elétricos ou eletromagnéticos. Mas esses métodos são de difícil aplicação em poços profundos (região do pré-sal), devido às altas temperaturas (acima de 200°C), altas pressões, e longas distâncias (quilômetros) entre o ponto de monitoramento e o ponto de leitura dos dados na superfície [9–11]. Essas características fazem desse tipo de sensoriamento um desafio tecnológico ainda sem solução definitiva.

Como já foi dito, sensores à base de fibra óptica podem ser usados em ambientes hostis. Por isso, esses sensores são ideais para aplicações em poços de petróleo. Sensores de temperatura e de pressão em poço, a base de fibra óptica, já são empregados pela Petrobrás de acordo com o Cenpes (Centro de Pesquisas Petrobrás) [4]. Contudo, os sensores ópticos de corrosão até então desenvolvidos e descritos na literatura são monopontos (monitoram um único ponto) [12, 13], ou usam fibra multimodo especial, com a casca (*cladding*) removida, onde é feita deposição de metal para que este seja afetado pelo processo de corrosão. Como resultado da corrosão, o metal é removido e mede-se então a diminuição da atenuação óptica do sinal em modos propagantes de ordem superior [14–17].

Recentemente, Martins-Filho e colaboradores propuseram um sistema de corrosão multiponto (monitora a corrosão em vários pontos ao mesmo tempo), auto-referenciado (imune a variações espúrias do nível de sinal óptico), e pode determinar a corrosão a quilômetros de distância [4, 6]. Esse sistema e seus resultados serviram de ponto de partida para o desenvolvimento desta tese.

A Figura 1.1 ilustra a proposta de sensoriamento de corrosão em poços de petróleo. Esse sistema sensor é colocado num poço de petróleo e em pontos específicos (cabeças

sensores) [18]. O monitoramento da corrosão é realizado através da luz gerada no ponto de leitura de dados e refletida nas cabeças sensoras retornando para o ponto de origem da luz.



**Figura 1.1:** Distribuição dos sensores de corrosão à base de fibra óptica nos dutos de poços de petróleo. As cabeças sensoras são representadas por pontos pretos ao longo dos dutos [18].

## 1.2 Organização do trabalho

Além deste capítulo introdutório, esta tese de doutorado foi dividida em mais cinco capítulos. Esses capítulos abordam os seguintes assuntos: 1) revisão da literatura sobre corrosão, 2) revisão da literatura sobre sensores ópticos à base de fibra óptica, 3) sensor óptico de corrosão amplificado, 4) influência da rugosidade de superfície no filme metálico na medida óptica e, por fim, 5) as conclusões e perspectivas para trabalhos futuros.

O Capítulo 2 apresenta uma revisão da literatura sobre corrosão. Esse capítulo destaca de forma geral o conceito de corrosão e sua importância. Dentro desse estudo, são abordados os tipos de corrosão que acontecem em metais, os mecanismos e também as técnicas usadas para proteger as estruturas metálicas da corrosão. Para finalizar esse capítulo são apresentados sistemas sensores de monitoramento da corrosão não-ópticos.

O Capítulo 3 apresenta uma revisão da literatura sobre sensores ópticos de fibra óptica. Esse capítulo foi preparado com o objetivo de dar uma abordagem geral sobre os sensores ópticos, mas dando destaque aos sensores a fibra óptica, que são usados como objeto de

estudo no desenvolvimento de outros esquemas de sensoriamento de corrosão (Capítulo 4). Além disso, são abordadas algumas aplicações envolvendo monitoramento de corrosão em outros sistemas ópticos que usam fibras ópticas. Esses comentários sobre as aplicações de sensores de fibra óptica na corrosão são importantes para que o leitor tenha uma melhor compreensão da importância deste trabalho. Isso porque, esse capítulo não tem como objetivo apontar a melhor técnica de monitoramento de corrosão, mas sim de expor várias técnicas de monitoramento de corrosão. O objetivo disso é estimular novas ideias, como melhorias em sistemas já existentes ou até mesmo novas técnicas de monitoramento de corrosão através dos fundamentos da óptica.

O Capítulo 4 destaca as melhorias feitas no sistema de corrosão proposto por Martins-Filho e colaboradores [4, 6]. Esses melhoramentos estão atrelados a uma melhor resolução espacial do sistema sensor de corrosão apresentado na Figura 1.1 e também ao aumento do alcance do monitoramento da corrosão. Uma melhor resolução espacial possibilita aumentar a quantidade de pontos de monitoramento da corrosão e junto a isso tem-se o aumento do alcance do sistema sensor, que permite monitorar (com confiabilidade) a corrosão a longas distâncias do ponto de leitura de dados (Figura 1.1). Para comparar o novo sistema sensor, com o proposto por Martins-Filho e colaboradores foi feita toda a caracterização desse novo sistema.

O Capítulo 5 apresenta uma análise detalhada sobre o resultado do experimento do processo de corrosão obtido a partir dos esquemas apresentados no Capítulo 4. Nessa análise, observa-se que fenômenos ópticos acontecem durante o processo de corrosão quando é feita a medição usando um pulso luminoso. O entendimento de tais fenômenos é de fundamental importância para a caracterização do resultado da corrosão obtido pelo sistema sensor, haja vista que esses fenômenos podem trazer outras informações a respeito do ambiente em que é colocado o sensor.

O Capítulo 6 destaca a importância dos resultados mostrados nos Capítulos 4 e 5, como também apresenta as perspectivas de trabalhos futuros que podem vir a contribuir com o aperfeiçoamento do sistema proposto no Capítulo 4 e também com uma melhor compreensão teórica dos resultados experimentais obtidos pelo sistema sensor de corrosão.

# CAPÍTULO 2

## CORROSÃO

**E**ste capítulo apresenta uma revisão da literatura sobre corrosão. Na Seção 2.1 é feita uma abordagem sobre o que é a corrosão como também outros aspectos que envolvem a corrosão. Na Seção 2.2 serão destacados os tipos de corrosão que podem aparecer nas estruturas metálicas. Já na Seção 2.3, têm-se os mecanismos que geram a corrosão em metais como também as formas de proteção metálica dos agentes corrosivos. Por fim, na Seção 2.4 são apresentados diversos sensores não-ópticos que monitoram o processo de corrosão em metais.

### 2.1 Sobre a corrosão

Numa definição geral, pode-se dizer que a corrosão é a deterioração do material, geralmente metálico, por efeitos de interação química e eletroquímica do meio ambiente com o material inserido nele, associado ou não a esforços mecânicos [7, 19, 20]. No caso dos metais, têm-se que os efeitos químico e eletroquímico são dados pelo processo de oxirredução, em que é observada a perda e o recebimento de elétrons entre o metal e o ambiente corrosivo (ar, água, ácido e outros) [19]. Com isso, o metal perde elétrons (chamado de agente redutor) para o ambiente corrosivo (chamado de agente oxidante) [19]. Logo, a corrosão pode ser vista como um modo de destruição do metal, progredindo através de sua superfície [19]. A deterioração causada pela corrosão do material gera prejuízos a ele, tais como desgaste, modificações estruturais e outros. Devido a isso, o material pode se tornar inadequado para uso [7, 19, 20].

A corrosão, em geral, pode ser considerada um processo espontâneo que está cons-

tantemente transformando os materiais metálicos de forma que a durabilidade e desempenho deixam de satisfazer à finalidade destinada a eles [19]. Por isso, o fenômeno da corrosão tem grande destaque na vida moderna, já que diversos setores economicamente produtivos, tais como as indústrias de gás e petróleo, geração e distribuição de energia elétrica, construções civis e militares, meios de comunicação, meios de transporte e outros, possuem em suas instalações materiais metálicos [19]. Todas essas instalações representam grandes investimentos que exigem durabilidade e resistência à corrosão, assim evitando danos financeiros, materiais e pessoais [19].

Como foi destacado, a corrosão pode promover problemas econômicos e sociais na vida moderna. Por isso, há um grande investimento científico e tecnológico no intuito de desenvolver produtos capazes de proteger da corrosão as instalações compostas por metais como também monitorar o processo de corrosão em tais instalações à medida que a proteção dessas instalações é comprometida por fatores ambientais [19]. Esse investimento é viável haja vista que os custos causados pela corrosão podem ser da ordem de bilhões de dólares, como exemplo, na indústria de petróleo e gás [21].

Contudo, a corrosão também tem seu lado benéfico e isso pode ser observado no metal exposto ao meio corrosivo, onde a reação química entre o metal e o meio corrosivo acontece na superfície do metal [19]. Com isso, em alguns casos, tem-se a oxidação do metal criando uma camada superficial estável e rígida protegendo assim o que sobrou de metal [19]. Esse efeito químico é chamado de passividade e nesta condição o metal não é mais corroído [19]. No entanto, outros agentes externos, como a erosão, podem interagir com essa camada protetora e como consequência ela é removida novamente expondo o metal ao meio corrosivo [19].

A passividade de metais é observada após processos industriais como a galvanização de metais, onde é colocado um metal de sacrifício sobre uma estrutura metálica que assim estará protegida da corrosão [19, 20]. Esse metal de sacrifício é passivado quando entra em contato com o meio corrosivo e por fim protege a estrutura metálica. Os metais de sacrifício comumente usados são o zinco e o alumínio [19, 20].

## **2.2 Tipos de corrosão**

Os tipos de corrosão em metais dependem do agente corrosivo que atua no material metálico [19, 20]. A caracterização do tipo de corrosão auxilia na determinação do mecanismo envolvido no processo de corrosão do metal e com isso possibilitando a aplicação de

medidas adequadas de proteção [19,20].

Os diferentes tipos de corrosão podem ser vistos na Figura 2.1, quando uma chapa metálica é exposta ao meio corrosivo. Os tipos de corrosão podem ser definidos como [19]:

- ▷ **Uniforme:** a corrosão acontece em toda a superfície do metal, ocorrendo mesma perda de material em todos os pontos da superfície do metal.
- ▷ **Por placas:** a corrosão é localizada em algumas regiões da superfície do metal e não em todas as regiões dele.
- ▷ **Alveolar:** a corrosão é dada na superfície do metal, onde a forma da corrosão parece alvéolos (pequena depressão gerada pela escavação da superfície do metal). Esse caso apresenta fundo arredondado e profundidade geralmente menor que o seu diâmetro.
- ▷ **Puntiforme ou pite:** a corrosão acontece em pontos ou em pequenas regiões da superfície do metal. Essas regiões apresentam cavidades cujo comprimento é maior do que seu diâmetro.
- ▷ **Intergranular:** a corrosão é observada através de grãos do material metálico na superfície do metal, o qual perde suas propriedades mecânicas e assim pode fratura quando é aplicado um esforço mecânico, tendo-se então corrosão sob tensão fraturante (CTF).
- ▷ **Intragranular:** a corrosão também é dada por grãos metálicos na superfície do metal, só que a fratura da superfície metálica é dada com menor esforço mecânico;
- ▷ **Filiforme:** a corrosão é observada através de finos filamentos, mas não profundos, que se propagam na superfície do metal em diferentes direções. Esse tipo de corrosão acontece geralmente em superfícies metálicas revestidas com tinta ou metal.
- ▷ **Esfoliação:** a corrosão acontece de forma paralela à superfície metálica. Nesse caso a corrosão ocorre nas inclusões ou segregações do material fazendo com que ela se estenda pelo plano da superfície metálica.
- ▷ **Empolamento pelo hidrogênio:** a corrosão acontece através do átomo de hidrogênio que penetra no material metálico e difunde-se rapidamente no interior do metal. O átomo de hidrogênio que interage com o metal se transforma em hidrogênio molecular ( $H_2$ ) e começa a exercer pressão proporcionando o surgimento de bolhas (empolamento) na estrutura metálica.
- ▷ **Em torno do cordão de solda:** a corrosão nesse caso ocorre em aços inoxidáveis com o teor de carbono maior que 0,03% e o tipo de corrosão é intergranular.



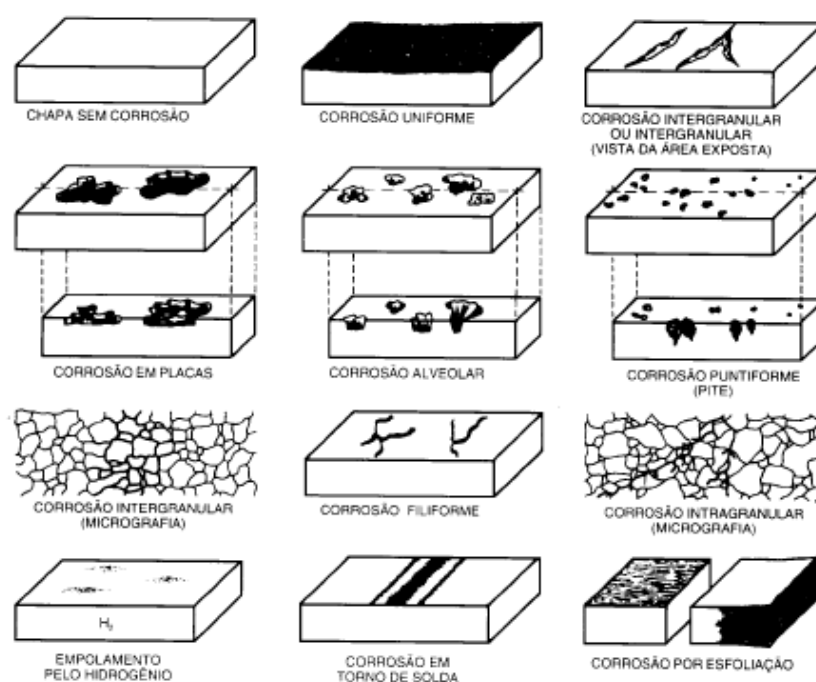


Figura 2.1: Tipos de corrosão em metais[19].

Os fatores que podem contribuir para o aparecimento dos tipos de corrosão apresentados na Figura 2.1 são: reações químicas e eletroquímicas, variação de pH (potencial de hidrogênio) onde quanto menor o pH maior será a concentração de hidrogênio no meio corrosivo, movimento relativo entre o metal e o meio corrosivo, impurezas no metal, teor de oxigênio no meio corrosivo que em alguns casos agiliza o processo de corrosão quando não há combinação com o metal formando um óxido, tratamentos térmicos ou mecânicos no metal, diferentes metais em contato e outros [19].

## 2.3 Mecanismos de corrosão e proteção de metais à corrosão

Como foi descrito na Seção 2.2, os tipos de corrosão no metal dependem dos respectivos meios corrosivos, que por sua vez determinam qual mecanismo de corrosão atua no metal. Os mecanismos de corrosão são dados por reações químicas e eletroquímicas [19]. Esses mecanismos podem ser determinados pelos meios corrosivos da seguinte forma [19]:

### 1. Mecanismo químico:

- ▷ Corrosão de metal em altas temperaturas por gases ou vapores e em ausência de umidade. Essa corrosão também é conhecida como corrosão seca.
- ▷ Corrosão em solventes orgânicos sem adição de água.

- ▷ Corrosão em materiais não-metálicos.

## 2. Mecanismo eletroquímico:

- ▷ Corrosão em água ou em soluções aquosas.
- ▷ Corrosão atmosférica.
- ▷ Corrosão no solo.
- ▷ Corrosão em sais fundidos.

Em resumo, pode-se considerar que o mecanismo químico ocorre quando há reações químicas entre o material metálico com o meio corrosivo pelo processo químico de oxirredução em altas temperaturas. Esse processo não é muito comum na natureza, haja vista que necessita de temperaturas elevadas para que ocorra o mecanismo químico. Além disso, não há geração de corrente elétrica [19, 20]. Já o mecanismo eletroquímico é dado por reações químicas que envolvem transferência de carga elétrica entre dois eletrodos [19, 20].

As formas de proteção de materiais metálicos são através de revestimentos e de inibidores de corrosão [19, 22]. O revestimento é feito com o objetivo de isolar o metal do meio corrosivo. Isto é feito através de revestimentos orgânicos inertes (tintas) ou com outros metais [22]. Os revestimentos mais usados são as tintas, esmaltes vítreos e os metais [22]. As tintas são bastante usadas em ambientes com umidade e além da sua composição orgânica inerte, ela é misturada a pigmentos de zarcão, cromato de chumbo e cromato de zinco, que contribuem para inibição da corrosão no metal [22]. Também é usada a mistura de tintas com zinco, alumínio e outros metais, onde a massa dessa mistura corresponde a 95% de metal [22]. Essa mistura é chamada de proteção sacrificial, onde neste caso o metal (zinco e alumínio) é usado como metal de sacrifício sendo exposto a reações eletroquímicas com o meio corrosivo e não o metal que deve ser protegido deste meio [22]. A proteção sacrificial é usada comumente na proteção de estruturas de ferro e de aço [19, 22].

Os inibidores de corrosão são substâncias aplicadas numa certa concentração no meio corrosivo com o objetivo de reduzir ou eliminar a ação corrosiva do meio no material metálico [19, 22]. Esse tipo de proteção é utilizada quando é possível caracterizar o mecanismo de corrosão do metal com o meio corrosivo [19, 22]. A interação dos inibidores com o meio corrosivo geram óxidos, hidróxidos, sais e outros, estabilizando o processo de corrosão no metal [19]. A classificação dos inibidores são [19]:

- ▷ **Inibidores anódicos:** retardam ou impedem a reação no ânodo como a perda de elétrons do material metálico. Funcionam criando um filme aderente e bastante insolúvel na superfície do metal e assim protegendo o metal do meio corrosivo. Os tipos de inibidores

anódicos são hidróxidos, carbonatos, silicatos, boratos e fosfatos terciários de metais alcalinos;

- ▷ **Inibidores catódicos:** atuam como fornecedores de íons metálicos capazes de reagir com o cátodo fazendo com que a difusão de oxigênio e a condução elétrica sejam finalizadas. Os tipos de inibidores catódicos são sulfatos de zinco, de magnésio e de níquel;
- ▷ **Inibidores de adsorção:** funcionam como películas protetoras tanto no ânodo quanto no cátodo com o objetivo de interferir na reação eletroquímica. Os exemplos de inibidores são materiais orgânicos com átomos de oxigênio, nitrogênio e outros.

## 2.4 Sensores não-ópticos para monitoramento da corrosão em metais

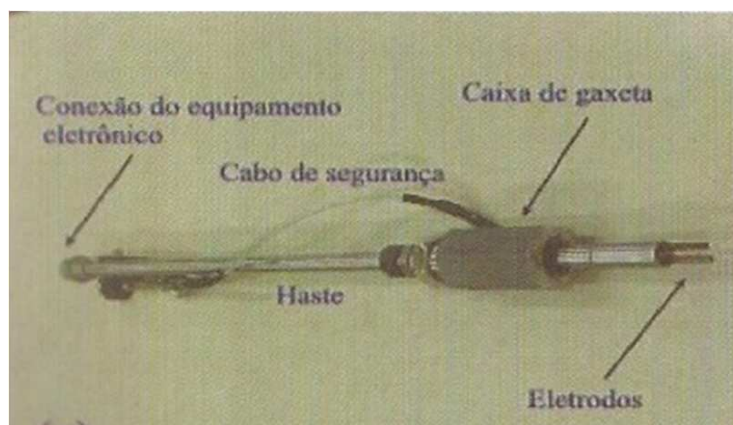
O monitoramento não-óptico da corrosão se destaca através dos sensores de resistência de polarização linear (RPL), impedância eletroquímica, ruídos eletroquímicos, correntes galvânicas, cupons de perda de massa, resistência elétrica e reflectometria no domínio do tempo e ultrassônicos [23–27].

O sensor de RPL é dado por um sistema eletroquímico, em que aplica-se entre eletrodos uma tensão variável da ordem de 10 mV em torno do potencial de corrosão (oxidação) do metal (eletrodo) que está imerso numa solução eletrolítica [23, 24]. Esse procedimento fornece respostas em corrente elétrica o mais linear possível [23, 24]. O objetivo desse sistema é determinar a resistência do material metálico através dos níveis de tensão e corrente elétrica medidos à medida que esse material é corroído. Esse sistema sendo monitorado no tempo é capaz de determinar a taxa de corrosão do metal para determinada solução eletrolítica [23, 24].

A Figura 2.2 ilustra um sensor de corrosão por RPL. Esse sensor apresenta dois eletrodos, sendo esses eletrodos constituídos do mesmo material. Além disso, esse sensor pode ser portátil, fixo e com ligação multiponto de monitoramento [23, 24].

As vantagens do RPL são o uso desse sensor tanto em laboratório quanto em campo e a determinação da taxa de corrosão do metal [23, 24]. Já as desvantagens do RPL são o uso limitado apenas para materiais metálicos e é adequado apenas para corrosão do tipo uniforme [23, 24].

O sensor de impedância eletroquímica consiste na aplicação de uma tensão variável em frequência (no intervalo de  $10^{-3}$  a  $10^3$  Hz) com o emprego de um potenciostato ligado aos eletrodos colocados numa solução eletrolítica [23, 24]. As medições da corrente elétrica que passam pelos eletrodos são feitas através do potenciostato e com esses valores de corrente



**Figura 2.2:** *Sensor de RPL [24].*

elétrica é possível determinar a impedância também chamada de impedância eletroquímica do sistema eletroquímico (potenciostato + eletrodos + solução eletrolítica) [23,24]. Através da impedância eletroquímica é possível determinar se o material sofreu um processo de corrosão (passivou) ou está sofrendo corrosão [23,24]. A conclusão disso está no efeito reativo da impedância eletroquímica, que para o efeito capacitivo o metal passivou e para o efeito indutivo o metal continua sofrendo o processo de corrosão [23,24].

Com relação à aplicação do sensor de impedância eletroquímica, ele pode ser usado em duas áreas [23,24]:

- ▷ Na parte de revestimentos, para estudar a qualidade dos revestimentos poliméricos como, por exemplo, tintas anticorrosivas para automóveis;
- ▷ Na análise de corrosão de metais, para monitoramento de corrosão do tipo localizada.

O sensor de ruído eletroquímico é dado por flutuações aleatórias e espontâneas do potencial de corrosão (oxidação) e da corrente elétrica analisadas através do processo de corrosão do material [23,24]. Esse sensor é mais preciso em meios onde a corrosão é do tipo uniforme quando comparado com o RPL [23,24]. Ele é composto por dois ou três eletrodos de mesmo material ligados a um voltímetro e a um amperímetro, que são capazes de determinar as flutuações de potencial e de corrente elétrica no eletrodo quando ele é imerso numa solução eletrolítica [23,24].

As vantagens desse sensor de ruído são respostas muito rápidas podendo ser utilizado em meios com baixa condutividade. Uma desvantagem do sensor é a dificuldade de fazer uma análise qualitativa entre as flutuações de potencial e de corrente elétrica, isso porque não há controle de frequência nestas flutuações [23,24].

O sensor de corrente galvânica é formado por dois eletrodos de metais diferentes uni-

dos (formando um bimetalo com diferença de potencial de corrosão natural), que são imersos num meio corrosivo. Através de reações químicas entre o meio corrosivo e os eletrodos, surge uma corrente galvânica. Essa corrente é registrada pelo amperímetro conectado aos eletrodos. À medida que um dos materiais metálicos sofre o processo de corrosão o tempo de resposta da corrente galvânica vai aumentando por causa da formação de óxidos nos eletrodos que tende a finalizar o processo de corrosão (passividade) [23, 24].

As vantagens do sensor de corrente galvânica são [23, 24]:

- ▷ É usado no mar para monitorar a atividade bacteriana (produção de enxofre que dá origem aos sulfetos) que gera corrosão em estruturas metálicas como poços de petróleo.
- ▷ Também é usado para identificação de oxigênio, já que o oxigênio é um catalisador, em alguns casos, do processo de corrosão.

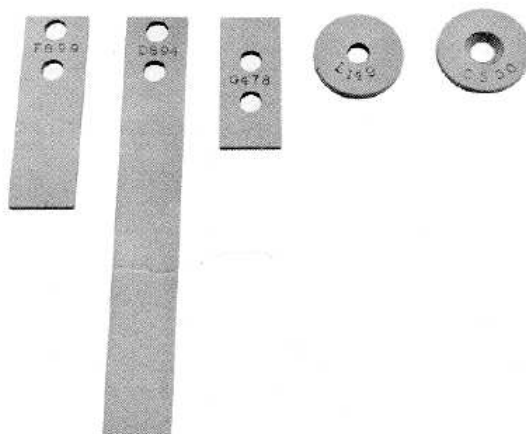
Já as desvantagens deste sensor são [23, 24]:

- ▷ Aplicado somente em meios condutores.
- ▷ Não funciona bem em meios com sulfeto.
- ▷ Formação de depósitos torna a resposta mais lenta.
- ▷ Não determina a taxa de corrosão. Indica apenas a presença de compostos oxidantes, ou seja, está havendo corrosão no eletrodo.

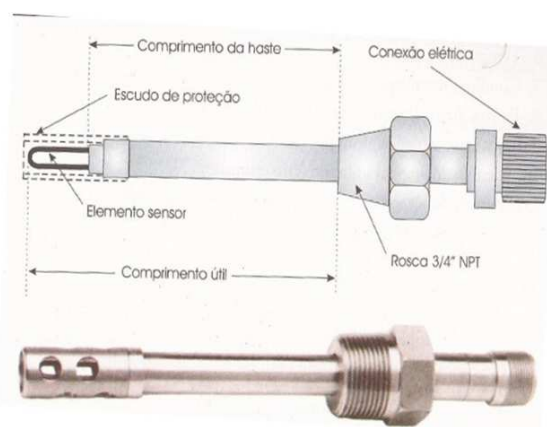
Os sensores de cupons de perda de massa são constituídos por pequenas cupons de aço, conforme ilustrado na Figura 2.3, que são expostas ao ambiente corrosivo. Esse sistema é bastante utilizado na avaliação do processo de corrosão em dutos de petróleo [24, 25]. Além disso, esse sensor é capaz de determinar a taxa de corrosão através da perda de massa da chapa metálica ao longo do tempo [24, 25]. A desvantagem desse sistema está no fato de que a taxa de corrosão só pode ser obtida com a retirada do cupon do ambiente corrosivo para que seja verificada a perda de massa [24, 25].

O sensor de resistência elétrica tem como característica medir a taxa de corrosão a partir da redução da área do metal em contato com o agente corrosivo [23, 24]. A variação dessa área provoca alteração na resistência do metal, que é inversamente proporcional à área, permitindo determinar a taxa de corrosão em tempo real [23, 24]. A Figura 2.4 apresenta o sensor de resistência elétrica composto por uma haste que conecta o elemento sensor (fio metálico) com a conexão elétrica. O elemento sensor é protegido por um escudo de proteção que evita danos por efeitos mecânicos e térmicos no elemento sensor [23, 24].

As vantagens do sensor de resistência elétrica são [23, 24]:



**Figura 2.3:** *Cupons de aço [25].*



**Figura 2.4:** *Esquema do sensor de resistência elétrica e o próprio sensor de resistência elétrica [24].*

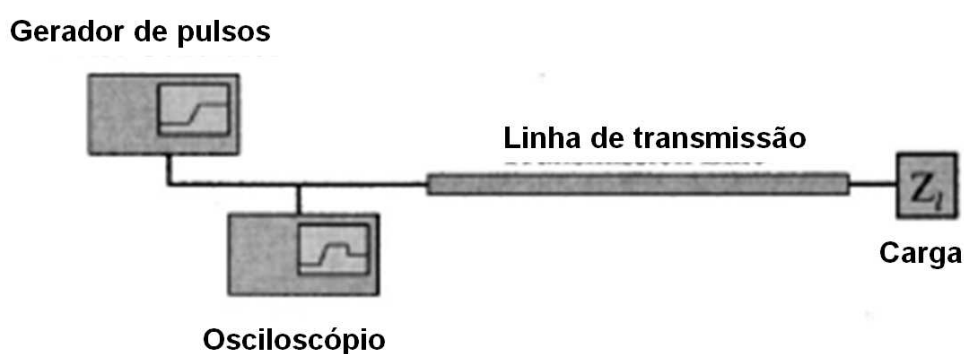
- ▷ Pode ser aplicado em qualquer meio corrosivo.
- ▷ Determina a taxa de corrosão em tempo real.
- ▷ Pode ser feito um sensoriamento multiponto.

Já as desvantagens deste sensor são [23, 24]:

- ▷ Pouco sensível à corrosão do tipo localizada.
- ▷ Em meios onde possa ocorrer formação de depósitos pode alterar os resultados.
- ▷ O elemento sensor é sensível a efeitos mecânicos e térmicos.

O sensor de reflectometria no domínio do tempo faz uso de uma linha de transmissão do tipo duplo condutor, como por exemplo, o cabo coaxial que tem como objetivo guiar o sinal elétrico com largura de pulso de 10 ns produzido pelo gerador de pulso até uma

carga com impedância  $Z_l$  conectada numa das extremidades da linha de transmissão, como ilustrado na Figura 2.5. O sinal elétrico que chega até a carga pode ser refletido desde que a impedância da carga não seja igual à impedância característica da linha de transmissão [26]. Sendo assim, o sinal refletido retorna pela linha de transmissão até o osciloscópio. À medida que a linha de transmissão é exposta a um meio corrosivo, as suas dimensões geométricas são alteradas a ponto de modificar o valor da impedância característica cujos parâmetros elétricos (indutância, capacitância e resistência por unidade de comprimento), que descrevem o circuito equivalente para linha de transmissão, dependem das dimensões geométricas da linha. Com isso, o sinal elétrico refletido pode determinar essas variações de dimensão ao longo do comprimento da linha de transmissão [26].



**Figura 2.5:** Esquema do reflectômetro no domínio do tempo usando linha de transmissão [26].

O uso do sensor por reflectometria no domínio do tempo é adequado para corrosões dos tipos uniforme e localizada, em particular, a corrosão do tipo pite [26].

Por fim, outro sistema capaz de monitorar o processo de corrosão no metal faz uso de ondas mecânicas (sonoras). Esse sistema é chamado de sensor ultrassônico e com ele é possível monitorar a corrosão a uma distância de aproximadamente 1 km em relação ao ponto de aquisição de dados [27]. O sensor ultrassônico é bastante usado no monitoramento de dutos de petróleo e gás e sua colocação é dada na parte externa do duto. O sensor é conectado a uma bateria que é fixa no solo próximo ao sensor. A função dessa bateria é alimentar o sensor no intuito dele gerar ondas sonoras que iram interagir com a superfície do duto como também fazer com que o sensor emita a resposta desta interação para um detector de ondas sonoras imerso na água que esta ligado numa plataforma de petróleo e gás ou até mesmo num navio petrolífero [27]. Este sensor é considerado multiponto e também de longo alcance, e sensível a corrosão do tipo localizado [27].

Em resumo, a Tabela 2.1 apresenta o conjunto de sensores não-ópticos com suas

principais características. Apesar de alguns sensores serem capazes de fornecer a taxa de corrosão, que é um parâmetro muito importante para caracterizar o processo de corrosão do metal num dado meio corrosivo, esses sensores apresentam algumas dificuldades no processo de instalação, obtenção da medida (em muitos casos o operador precisa estar próximo ao sensor), confiabilidade nos resultados e outros aspectos [23,24,26]. Com relação ao alcance do monitoramento da corrosão desses sensores, não há informação por parte dos autores Nunes e Jambo [23,24]. Isso porque, na maioria dos casos a coleta de dados do processo de corrosão é feita no próprio ambiente onde é instalado o sensor e quando isto não ocorre, a distância entre o ponto de monitoramento e o local de coleta de dados é desprezível [23,24]. Assim, pode-se dizer que estes sensores são de curto alcance (até de dezenas de metros). Outros sensores não fornecem a taxa de corrosão, porém servem para verificar se o processo de corrosão foi iniciado no metal [23,24]. De todos os sensores apresentados na Tabela 2.1 apenas um deles é do tipo distribuído [26]. No entanto, o que poderia ser uma vantagem no monitoramento da corrosão, já que poderia ser observada a corrosão em toda a extensão da linha de transmissão, seu alcance é limitado entre 2 e 3 quilômetros [26]. Isso se deve à perda de energia do pulso elétrico, ruído elétrico e dispersão de onda ao longo da linha de transmissão [26]. Apesar disso, pode-se dizer que ele é de longo alcance (dá ordem de quilômetros de distância). Outro sensor bastante utilizado no monitoramento da corrosão é o sensor ultrassônico que faz uso de ondas mecânicas para verificar a corrosão do metal ao longo do tempo [27].



**Tabela 2.1:** Características dos sensores de corrosão não-ópticos.

<b>Sensores</b>	<b>Tipo de sensor</b>	<b>Deteção</b>	<b>Alcance</b>	<b>Taxa de corrosão</b>	<b>pH</b>
RPL[23,24]	Multiponto	Corrente	Curto	Sim	Não
Impedância eletroquímica[23,24]	Monoponto	Corrente	Curto	Não	Não
Ruído eletroquímico [23,24]	Monoponto	Corrente e tensão	Curto	Sim	Não
Correntes galvânicas [23,24]	Monoponto	Corrente	Curto	Não	Não
Cupons de perda de massa[24,25]	Monoponto	Massa	Curto	Sim	Não
Resistência elétrica[24]	Multiponto	Resistência	Curto	Sim	Não
Reflectômetria no domínio do tempo[26]	Distribuído	Reflexão	Longo	Sim	Não
Ultrassônico[27]	Multiponto	Transmissão	Longo	Sim	Não

# CAPÍTULO 3

## SENSORES DE CORROSÃO À FIBRA ÓPTICA

O objetivo deste capítulo é promover uma revisão da literatura sobre sensores ópticos à base de fibra óptica, onde serão destacados os aspectos gerais desse tema. Na Seção 3.1 é apresentada de maneira geral a importância dos sensores ópticos para a sociedade. Na Seção 3.2, são destacados os sensores à fibra óptica. Na Seção 3.3, são abordados os fundamentos teóricos que serão empregados no Capítulo 4. Além disso, são apresentadas algumas aplicações sobre sensores de corrosão à base de fibra óptica na Seção 3.4.

### 3.1 Sensores ópticos

Sistemas ópticos estão sendo considerados como a tecnologia do século XXI. Essa indicação foi dada por vários grupos de pesquisa ligados a sensores ópticos em todo o mundo [28]. Já no início do século XX, os sensores ópticos desempenhavam um papel vital em diversas aplicações como sensores de chuva [28], distância [29,30], velocidade [30], tensão [31], temperatura [32], pressão [33], entre outras aplicações [28].

Os sensores ópticos oferecem várias vantagens sobre seus concorrentes eletrônicos e mecânicos. Como destaque, tem-se a sua grande faixa dinâmica de atuação a baixo ruído e sua alta sensibilidade às variações das propriedades da medida. Além disso, a medida óptica está isolada de interferências do meio externo e por isso não há erros sistemáticos na medição [28].

Muito esforço também tem sido dedicado na diminuição das dimensões dos sensores

ópticos no intuito de integrá-los em projetos de circuitos (*chips*) eletro-ópticos. Isso pode ser utilizado no aumento da quantidade de *pixels* no sensoriamento de imagens em geral e a aplicação tecnológica disso pode ser vista em celulares, computadores portáteis, câmeras de vigilância em miniatura e em *mouses* ópticos [34].

Independente dos seus princípios de funcionamento e propósitos, todos os sensores ópticos têm em comum um conjunto de componentes: fontes de luz, componentes ópticos para guiar a luz no meio e fotodetectores. Com isso, qualquer variação da luz em qualquer lugar ao longo deste guiamento poderá ser objeto de medição [28]. Na Seção 3.2, destacam-se os sensores ópticos à base de fibra óptica.

### 3.2 Sensores à fibra óptica

Os primeiros sensores à fibra óptica foram desenvolvidos na segunda metade do século XX. Seu desenvolvimento revolucionou diversas áreas tecnológicas, como nas telecomunicações e na medicina. Essa revolução, que continua até hoje, deve-se à alta capacidade de transmissão de dados em alta velocidade, com baixas perdas associadas a esse tráfego de dados, e também à capacidade de monitorar e detectar doenças em lugares de difícil acesso no corpo humano, como por exemplo, no estômago e no intestino [35]. Porém, as aplicações de sensores em fibra óptica não se limitam apenas a essas áreas. Nesta seção, outras áreas de aplicação desses sensores são destacadas.

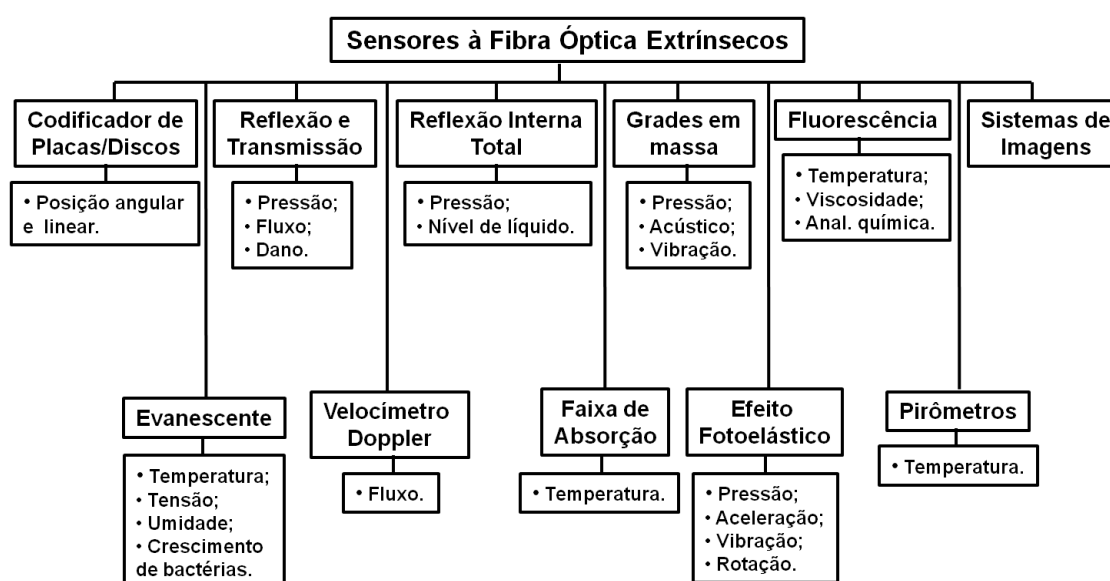
A tecnologia dos sensores à base de fibra óptica deve seu desenvolvimento a dois dos mais importantes avanços científicos realizados na década de 60. Esses avanços foram o *laser* (*Light Amplified by Extimulated Emission*) (1960) e as fibras ópticas (1966). Assim em 1970, os primeiros experimentos, utilizando *lasers* e fibras ópticas de baixas perdas, aconteceram na área de telecomunicações [35]. Isso foi o ponto de partida na motivação do desenvolvimento de sensores ópticos.

As fibras ópticas surgiram como grande revolução tecnológica nas telecomunicações [36,37]. O uso das fibras ópticas nas telecomunicações tornou possível melhorar a transmissão de dados. Isso pode ser observado através da baixa atenuação do sinal óptico na fibra e também na alta velocidade de transmissão dos dados (informação). Outra revolução tecnológica veio através do desenvolvimento de novas técnicas usando dispositivos optoeletrônicos, que em conjunto com a diminuição de custo dos seus componentes, tornou viável a produção em massa desses dispositivos em escala comercial e assim surgiram novas aplicações, como, por exemplo, leitores de discos compactos, impressoras a *laser* e outros [38]. A terceira

revolução está emergindo através da combinação das fibras ópticas aplicadas nas telecomunicações e dispositivos optoeletrônicos para criação dos sensores à fibra óptica [35, 39].

As aplicações de sensores à fibra óptica tendem a crescer ao longo dos anos por causa de seu grande potencial em substituir outros tipos de sensores ópticos, e não-ópticos com mesma finalidade, e também no desenvolvimento de novas técnicas de monitoramento para futuras aplicações [35]. As Figuras 3.1- 3.3 fornecem uma visão geral dos tipos de sensores à fibra óptica que estão sendo desenvolvidos e os respectivos parâmetros ambientais que estes sensores monitoram [35].

A Figura 3.1 estabelece os tipos de sensores à fibra óptica extrínsecos e/ou híbridos. Os sensores à fibra óptica extrínsecos são aqueles em que a detecção ocorre na parte externa da fibra óptica, isto é, a fibra é usada apenas para transportar potência óptica ao local de monitoramento e também na volta para o receptor [35]. Os sensores híbridos são também sensores extrínsecos, porém são chamados híbridos quando o elemento sensor externo pode ser baseado na eletrônica, ou seja, a radiação óptica transportada pela fibra óptica é convertida em sinal elétrico que será depois codificada [35]. Este tipo de sensor não é totalmente óptico [35].



**Figura 3.1:** Sensores à fibra óptica extrínsecos e/ou híbridos [35].

A Figura 3.2 mostra um diagrama para sensores intrínsecos. Neste caso, a detecção ocorre dentro da própria fibra, isto é, a detecção é feita através da variação das propriedades ópticas da radiação guiada [35]. Ainda sobre sensores intrínsecos, pode-se destacar uma subclasse de grande importância chamada de sensores interferométricos, como mostrado no diagrama da Figura 3.3. Muitos sensores de alto desempenho pertencem a este grupo [35].

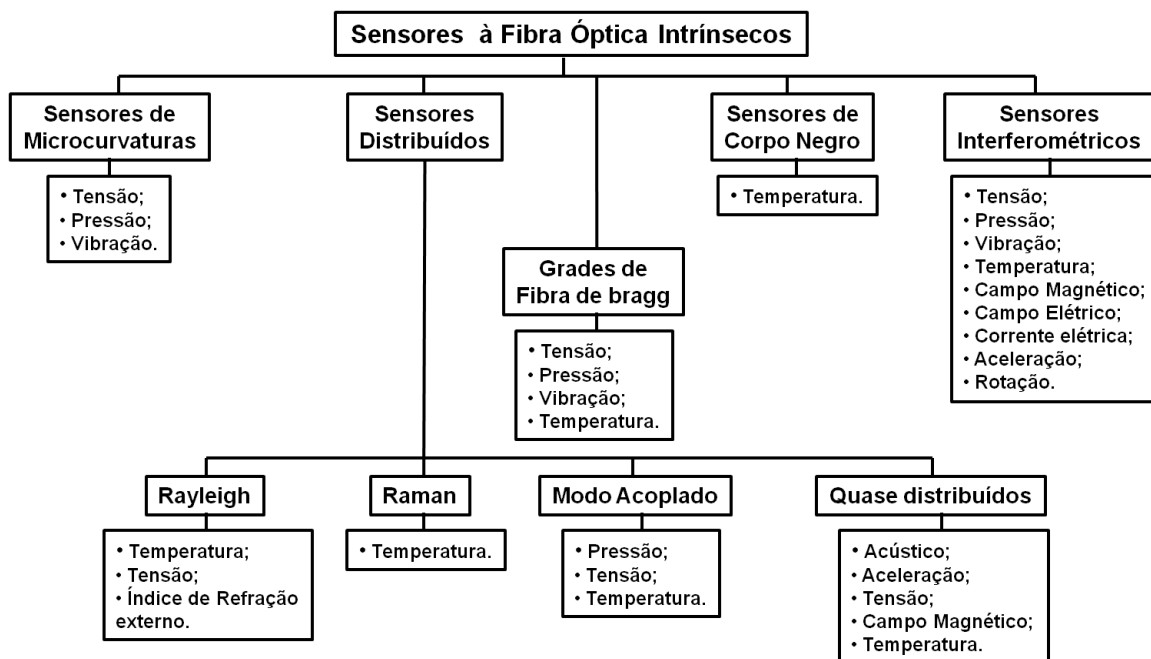


Figura 3.2: Sensores à fibra óptica intrínsecos [35].

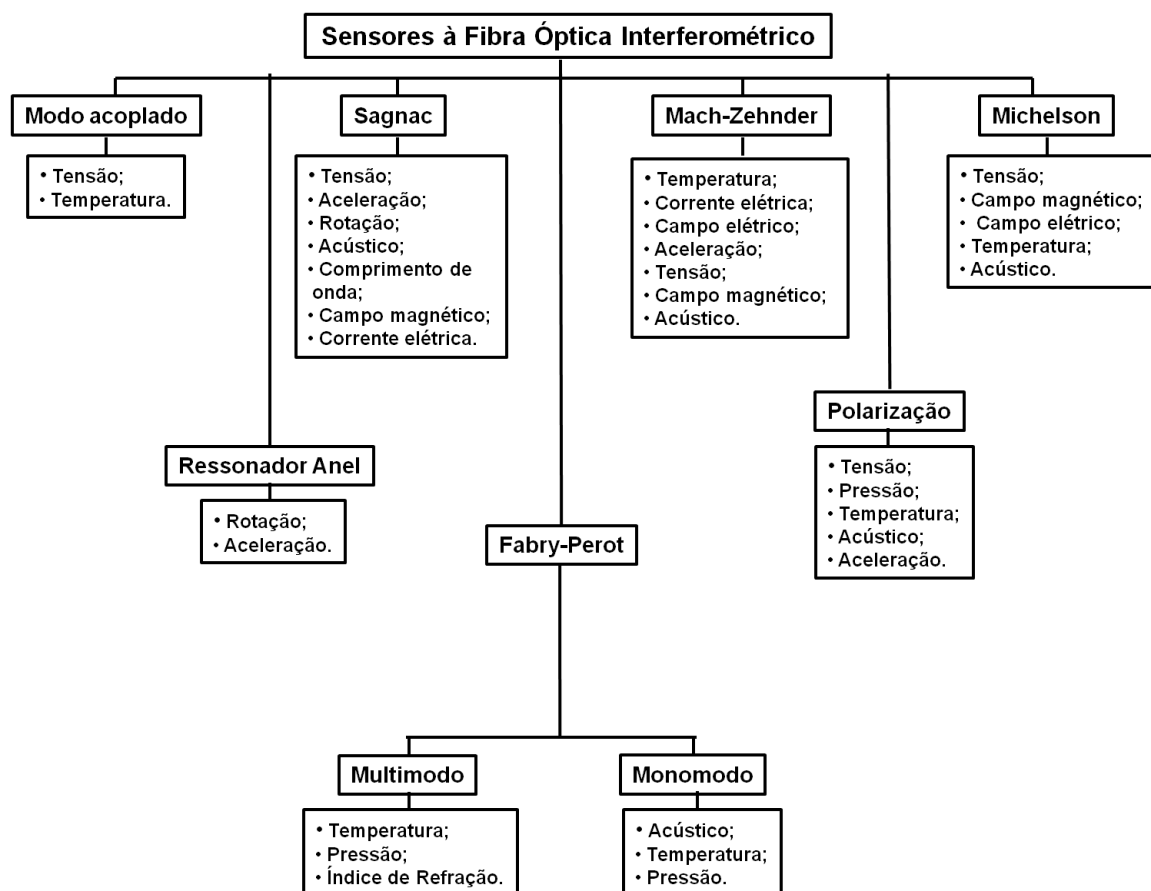


Figura 3.3: Sensores à fibra óptica interferométrica [35].

É importante destacar que apesar de se classificar os sensores de fibra óptica como sendo intrínseco e extrínseco, é possível cruzar essas duas classes de sensores. Esse cruzamento pode ser dado, por exemplo, através dos sensores interferométricos com os sensores extrínsecos e/ou híbridos [35, 39]. Dentre a grande diversidade de sensores à fibra óptica apresentados nas Figuras 3.1- 3.3, destaca-se, nesta tese, os sensores à fibra óptica distribuídos e quase-distribuídos. Essa categoria de sensores será a base para o entendimento da contribuição científica e tecnológica deste trabalho, que será apresentada no Capítulo 4.

### 3.2.1 Sensores à fibra óptica distribuídos

Sensores distribuídos fazem parte de uma classe de sensores intrínsecos, que incluem os sensores ópticos baseados em espalhamento Rayleigh, no efeito Raman, no acoplamento de modos e sensores quase-distribuídos.

O primeiro conceito sobre sensores distribuídos foi proposto e demonstrado por Rogers [40, 41] e Ross [42]. Esses sensores analisam tipicamente perdas e/ou espalhamento de luz num dado comprimento de fibra óptica. Com o uso de técnicas de reflectometria óptica, tais como a reflectometria óptica no domínio do tempo (OTDR - *Optical Time-Domain Reflectometry*), pode-se observar na Figura 3.4 o princípio de operação de um sensor distribuído [43]. Nesse caso, o pulso de luz inserido na fibra óptica é refletido devido a alguma perturbação local na fibra óptica e o resultado dessa reflexão é observado através do pulso refletido ( $I_r$ ) no local onde ocorreu a perturbação. Essa análise é feita no domínio do tempo. A perturbação do sinal óptico refletido na fibra óptica pode ser dada por efeitos internos na fibra óptica (espalhamento de luz, atenuação na fibra, emissão estimulada e fluorescência) e efeitos externos aplicados na fibra óptica (tensões mecânicas, efeitos térmicos, entre outros) [44].

Além do OTDR, outra técnica de medição pode ser utilizada como sensor distribuído, conforme ilustrado na Figura 3.5. Essa técnica de medição é a reflectometria óptica no domínio da frequência (OFDR - *Optical Frequency-Domain Reflectometry*), que também é usada para medir efeitos lineares, como o espalhamento Rayleigh e não-lineares, como o efeito Raman, que acontecem ao longo da fibra óptica [37]. Além disso, também é possível usar essa técnica para estudo de modos acoplados, onde a medida é dada através da mudança de polarização da luz [44].

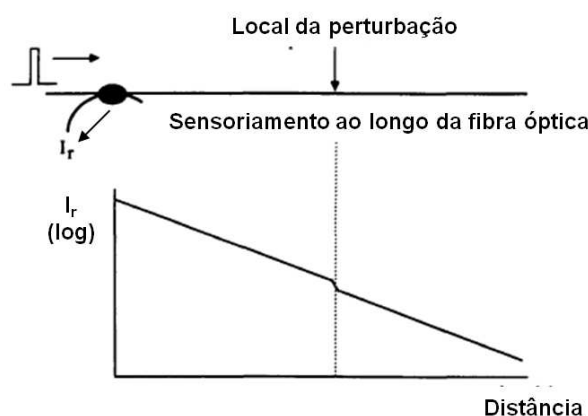


Figura 3.4: Sensor distribuído usando OTDR [44].

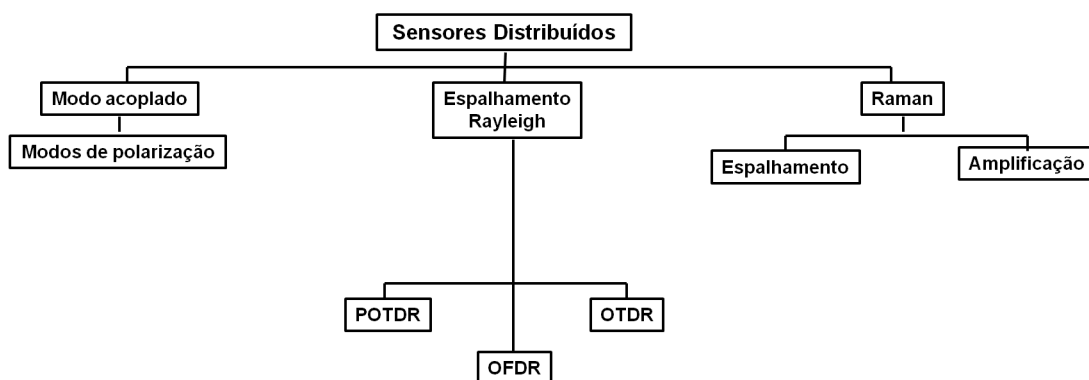


Figura 3.5: Mecanismos de sensoriamento distribuído [44].

### 3.2.2 Sensores à fibra óptica quase-distribuídos

Os sensores quase-distribuídos fazem parte do grupo de sensores intrínsecos e, mais especificamente, de sensores distribuídos, conforme a Figura 3.2. A diferença entre os sistemas distribuídos e quase-distribuídos está associada ao processo de medição, ou seja, enquanto o processo de medição no sensor distribuído é feito em toda a extensão da fibra, no sensor quase-distribuído, ele é realizado em pontos bem definidos (discretizados).

A Figura 3.6 mostra vários métodos que podem ser utilizados para efeito de detecção em sistemas de fibra óptica quase-distribuídos [44]. No sistema sensor quase-distribuído, tem-se o uso de 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, conforme ilustrado na Figura 3.6.

Os sensores quase-distribuídos possibilitam, em certos pontos (discretos), as medições de intensidade de luz refletida na fibra óptica, como também variações de polarização e fluorescência [35,44]. A Figura 3.7 mostra um simples esquema de sensor quase-

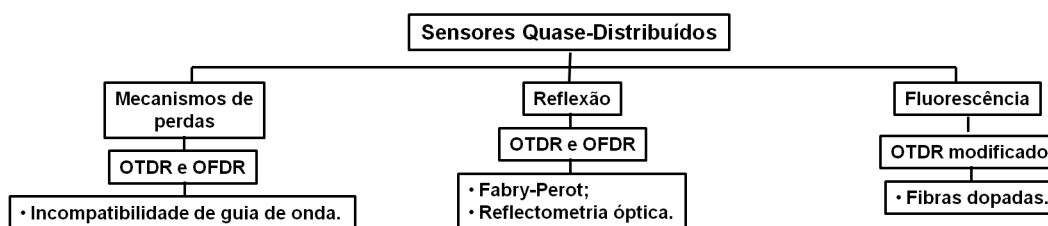


Figura 3.6: Metodos de sensoriamento quase-distribuído [44].

distribuído, onde é possível medir variações de campo elétrico através da transmitância e da reflectância em pontos isolados na fibra óptica, de corrente de variações ambientais, como temperatura, pressão entre outros [35]. Um exemplo disso foi proposto por Theocharous em 1983, que desenvolveu um sensor quase-distribuído de temperatura [45].

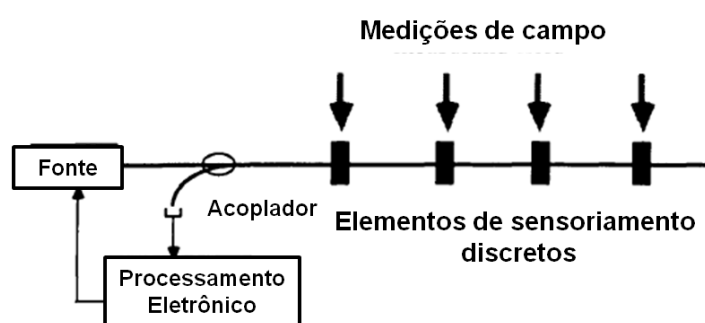


Figura 3.7: Esquema simplificado de um sensor quase-distribuído [44].

Além da configuração apresentada na Figura 3.7, os sensores quase-distribuídos podem ser utilizados como redes de sensores multiplexados, conforme mostrado na Figura 3.8. A primeira rede sensora multiplexada foi proposta por Nelson e colaboradores [46], que conseguiram gerar uma série de pulsos distintos com apenas um único pulso de entrada. O sistema apresentado na Figura 3.8 apresenta fontes com diferentes comprimentos de onda, onde são todos separados por multiplexadores de comprimento de onda (WDM - *Wavelength-division multiplexing*) e derivados para os pontos de monitoramento do sensor. A luz refletida nesses pontos de monitoramento é demultiplexada pelo WDM e em seguida detectada separadamente por comprimentos de onda na saída.

Sistemas multiplexados são bastante utilizados em comunicações ópticas há muitos anos [47, 48], porém o uso desses sistemas em sensores é ainda pequena, apenas limitada a possíveis aplicações em sensores interferométricos. Isso se deve por causa da incerteza nas possíveis vantagens na aplicação do sistema sensor multiplexado quando comparado a outros sistemas de sensoriamento óptico e também no custo de implementação do sistema



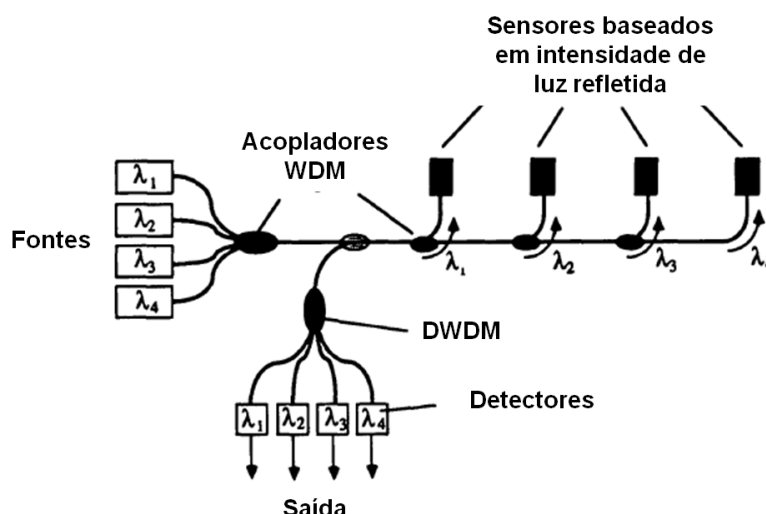


Figura 3.8: Esquema de uma rede de sensores multiplexados [44].

sensor multiplexado.

### 3.3 Reflectometria óptica

A reflectometria óptica aplicada em fibras ópticas é uma técnica utilizada na caracterização de enlaces e dispositivos ópticos. Sua natureza é não destrutiva, pois analisa o sinal que retorna quando um sinal proveniente da fonte é inserido no dispositivo sob teste [49]. As técnicas de reflectometria óptica mais conhecidas são OFDR e OTDR [50].

A OFDR usa fonte óptica contínua de detecção coerente e por esse motivo é considerada uma técnica de alta resolução espectral, porém de baixa resolução espacial. Por isso é usada para caracterização de pequenos enlaces ou dispositivos ópticos com alguns metros de comprimento de fibra óptica [37, 51]. O processo de medição na OFDR é dado por interferometria óptica, onde o sinal óptico aplicado ao interferômetro de Michelson é dividido e parte desse sinal vai para um braço teste e a outra parte do sinal vai para o braço de referência. O resultado disso são as franjas de interferência que aparecem devido à diferença dos comprimentos das fibras nos dois braços do interferômetro [50].

Outro tipo de reflectometria óptica é a OTDR. O princípio de funcionamento dessa técnica consiste em enviar, numa fibra óptica, um sinal de pulso óptico curto e observar esse sinal espalhado que retorna pela fibra óptica. Se houver algum problema na fibra, acarretando perdas no sistema, o sinal espalhado mostrará esse problema com a diminuição da intensidade óptica espalhada. Fazendo o cálculo do tempo de propagação do pulso, é possível determinar a posição do problema na fibra. Esse tipo de reflectometria é bastante usado

como teste de continuidade de sinal óptico em sistemas ópticos de longas distâncias [50].

Existem outros tipos de técnicas OTDR chamados de OTDRs modificados. Essas técnicas de OTDRs modificados são a OTDR Coerente (CO-OTDR - *Coherent OTDR*), OTDR de Correlação (C-OTDR - *Correlation OTDR*) e a OTDR de Polarização (PO-OTDR - *Polarization OTDR*) [52,53]. Apesar dessas técnicas de OTDRs modificados terem objetivos específicos, seja na melhoria da resolução do sinal, na faixa dinâmica e também na medida envolvendo mudança de polarização do sinal no tempo, elas compartilham dos mesmos princípios básicos de funcionamento da técnica OTDR padrão ou simplesmente OTDR [52,53].

É destacado nesta seção a técnica OTDR padrão, já que essa técnica é usada nos sistemas apresentados no Capítulo 4.

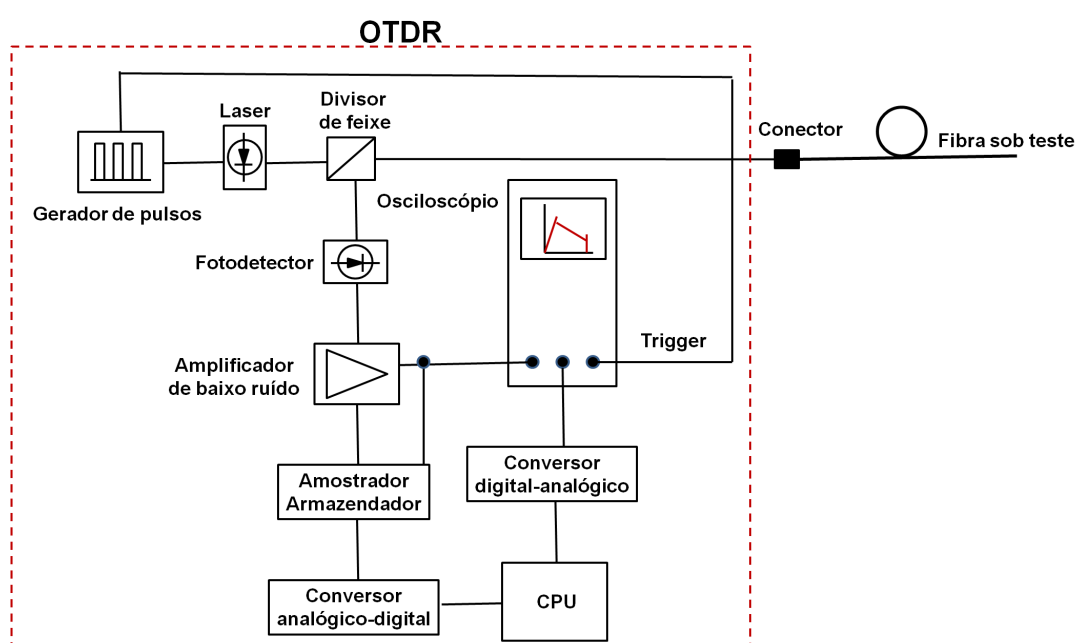
### 3.3.1 Princípio da reflectometria óptica no domínio do tempo

A reflectometria no domínio do tempo é um dos métodos mais eficientes para a análise de uma instalação de fibra óptica [54]. É usada na detecção de pontos com defeitos em fibras, emendas e conectores. Além disso, é possível medir a atenuação do enlace óptico e a perda nos componentes ópticos conectados à fibra óptica. Pode ser dito que a técnica de OTDR funciona como se fosse um radar óptico em circuito fechado, ou seja, gera o pulso que se propaga ao longo da fibra e também detecta o pulso refletido na fibra. Esse pulso gerado tem parâmetros de amplitude e duração bem definidos e é lançado na fibra em uma das suas extremidades. O objetivo é medir a amplitude desse pulso nas reflexões que ocorrem ao longo da fibra em todos os instantes de tempo. A comparação entre a luz gerada e a refletida produz uma série de informações sobre o meio de transmissão.

Pela técnica de OTDR podem-se gerar vários pulsos sequenciados. O intervalo de tempo entre esses pulsos de luz ( $T_r$ ) que determina um período e uma frequência de repetição, ou de recorrência, é muito grande quando comparado com o tempo de duração do pulso óptico (largura do pulso) ( $T_p$ ). Gerar pulsos de curta duração possibilita uma melhor resolução na medida e conseqüentemente uma maior precisão na localização das possíveis falhas na fibra [55].

Na prática, a técnica de OTDR pode ser aplicada pelo equipamento chamado de reflectômetro óptico no domínio do tempo (OTDR - *Optical Time-Domain Reflectometer*) como ilustrado na Figura 3.9. Nessa figura têm-se um diagrama em blocos simplificado do princípio de operação do OTDR [55,56]. Esse sistema consiste de um *laser* semiconductor, cuja luz emitida é modulada em amplitude por pulsos retangulares. Esses pulsos têm largura de 150 ps a 500 ns, com períodos de recorrência variando de 200  $\mu$ s a 1 ms (esses valo-

res dependem do modelo de OTDR). A luz modulada passa por um divisor de feixe, onde parte da luz segue para a fibra sob teste através do conector de fibra óptica e a outra parte é direcionada para um fotodetector. A luz refletida na fibra óptica é também direcionada para o fotodetector. Essa luz refletida e a outra parte da luz incidente no divisor de feixe são convertidas em sinais elétricos e o resultado final é dado pela razão, a cada instante, do sinal elétrico refletido com o sinal elétrico incidente (referência). O resultado dessa razão entre os sinais elétricos determina o quanto de potência luminosa foi refletida num dado ponto da fibra sob teste e isso pode ser observado através da tela do osciloscópio. Com isso, é possível identificar a atenuação do pulso em função do seu deslocamento na fibra óptica [55, 56].



**Figura 3.9:** Diagrama em blocos de um sistema básico de medição usando o OTDR [54].

### 3.3.2 Interpretação dos resultados obtidos com o OTDR

O pulso de luz, que retorna para a extremidade de entrada da fibra, é gerado por dois mecanismos distintos. O primeiro mecanismo é dado pela reflexão que ocorre em qualquer interface (fronteira) de separação entre dois meios (fibra óptica-meio externo) com propriedades eletromagnéticas diferentes [57]. O campo refletido na interface é determinado pelas equações de Fresnel, através da incidência normal da luz na interface [54]. A razão entre os campos refletido e incidente define o coeficiente de reflexão de Fresnel. Fazendo o módulo quadrado do coeficiente de Fresnel define-se a reflectância do pulso ( $\Gamma_p$ ) que depende dos índices de refração dos dois meios envolvidos [54].

O segundo mecanismo de perda ocorre ao longo da fibra óptica através do espalhamento Rayleigh [54]. Ao aplicar um pulso com energia  $E_0$  numa fibra óptica de comprimento  $L$ , a energia do pulso que se propaga na fibra será igual a [54]

$$E(L) = E_0 \exp(-\alpha_s L) = E_0 \exp(-A), \quad (3.1)$$

em que  $\alpha_s$  é o fator de atenuação da energia propagante e  $A = \alpha_s L$  representa a atenuação total ocorrida no trecho. Considerando que a única fonte de perda na fibra óptica é devida ao espalhamento Rayleigh, tem-se da Equação 3.1 que para um comprimento diferencial  $dL$  da distância percorrida pelo pulso há uma variação de energia do pulso  $dE$  dada por [54]

$$dE = -\alpha_s E(L) dL. \quad (3.2)$$

A Equação 3.2 mostra a taxa de queda da energia. Uma certa quantidade  $S$  dessa energia espalhada é captada pelo núcleo da fibra, que a direciona de volta ao seu início. Esse fenômeno é conhecido como retroespalhamento [54]. No retorno, a energia do pulso é novamente atenuada e essa quantidade de energia que chega na entrada da fibra é dada por [54]

$$(dE)_e = S\alpha_s E(L) \exp(-\alpha_s L) dL = S\alpha_s E_0 \exp(-2\alpha_s L) dL, \quad (3.3)$$

em que  $S$  é a quantidade de luz retroespalhada que retorna para o detector conectado à fibra óptica.

A luz refletida chega ao início da fibra num intervalo de tempo  $t = 2L/v_g$ , onde  $v_g$  é a velocidade de grupo do pulso que se propaga no núcleo da fibra. Portanto, para um trecho  $dL$ , o incremento de tempo é  $dt = 2dL/v_g$ . Reescrevendo a Equação 3.3 em termos do incremento de tempo, é possível determinar a potência retroespalhada  $P_s$  como sendo [54]

$$P_s = \frac{(dE)_e}{dt} = \frac{SE_0\alpha_s v_g}{2} \exp(-2\alpha_s L) = \frac{SE_0 v_g \alpha_s}{2} \exp(-2\alpha_s (v_g t/2)). \quad (3.4)$$

Considerando o pulso óptico com uma largura de pulso  $T_p$ , a potência óptica desse pulso é

$$P_{pt} = E_0/T_p. \quad (3.5)$$

A potência que volta ao início da fibra por reflexão de Fresnel vale

$$P_{rf} = \Gamma_p(E_0/T_p) \exp(-2\alpha_s L). \quad (3.6)$$

Fazendo a razão entre as Equações 3.6 e 3.4, obtém-se [54]

$$\frac{P_{rf}}{P_s} = \frac{2\Gamma_p}{S\alpha_s v_g T_p}. \quad (3.7)$$

A Equação 3.7 mostra uma relação entre a potência por reflexão de Fresnel e a potência retroespalhada que depende dos parâmetros da fibra e da luz que se propaga através dela [54]. Ainda na Equação 3.7, o parâmetro  $S$  também é de grande importância para essa relação de potências, já que ela é derivada de uma relação analítica que descreve sua magnitude para as fibras monomodo e multimodo com um determinado perfil de índice de refração [58]. Em outras palavras, o parâmetro  $S$  depende do tipo de fibra óptica utilizada como guia de onda. Logo, isso deve influenciar na magnitude da potência.

O equipamento OTDR utilizado nos esquemas mostrados no capítulo 4 é um modelo comercial da Anritsu (Modelo 9076B). Esse equipamento é configurado para trabalhar com dois comprimentos de onda de 1310 nm e 1550 nm para as faixas dinâmicas (faixa de funcionamento do OTDR entre a saturação e a menor potência detectada pelo fotodetector) de 40 dB e 38 dB, respectivamente. Possui uma largura de pulso que varia de 10 a 500 ns [54].

O resultado obtido pelo OTDR pode ser visto na Figura 3.10. Podem-se destacar na Figura 3.10 as variações dos valores de potência retroespalhada ao longo do núcleo da fibra [59]. Além disso, há atenuação devida à reflexão de Fresnel no acoplamento da luz do *laser* com a fibra óptica e também em pontos discretos ao longo da fibra óptica. Essa conexão deve ser bem feita para evitar perda óptica logo no início da fibra óptica.

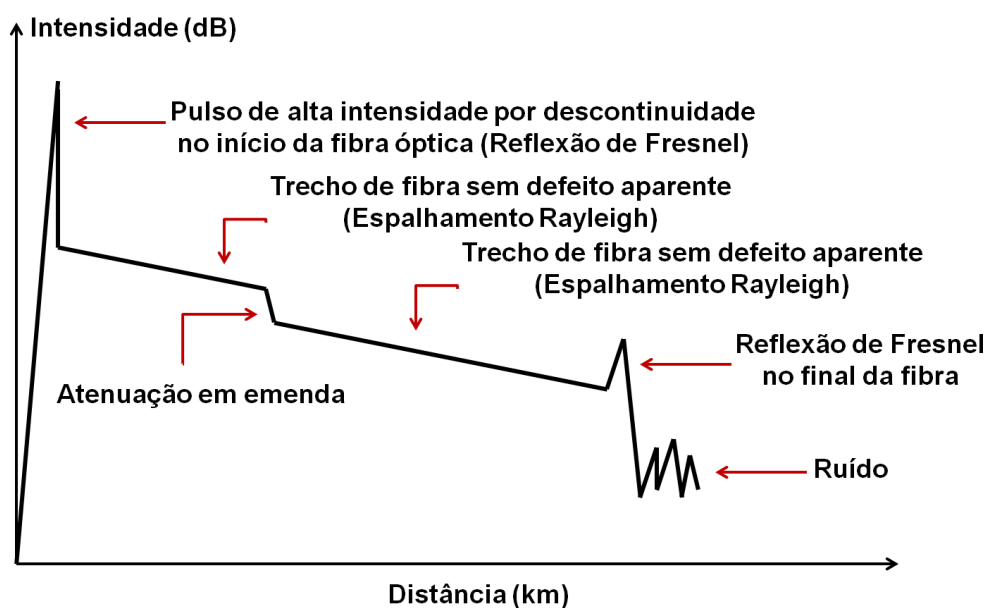


Figura 3.10: Curva de potência em função da distância observada no OTDR [54].

A velocidade da onda guiada na fibra óptica é dada pela velocidade de grupo  $v_g$  e também pelo índice de refração de grupo  $n_g$  [37, 60]. Com isso, pode-se determinar o local,  $D$ , iluminado pelo pulso óptico em um dado instante de tempo, ou seja, [54]

$$D = \frac{v_g t}{2} = \frac{ct}{2n_g}, \quad (3.8)$$

em que  $t$  é o tempo de propagação de ida e volta do pulso óptico na fibra óptica e  $c$  é a velocidade da luz no vácuo. O OTDR possibilita selecionar automaticamente, ou manualmente, o índice refração de grupo para o comprimento de onda escolhido. A faixa de índice de refração de grupo determinado por esse OTDR vai de 1,4 até 1,69. Por fim, para o comprimento de onda de 1550 nm o índice de refração de grupo da sílica corresponde a 1,468 [37]. Esse comprimento de onda é usado nos experimentos mostrados no Capítulo 4.

### 3.4 Aplicações de sensores de fibra óptica no monitoramento da corrosão em metais

Nesta seção, destaca-se algumas aplicações sobre sensores de corrosão à base de fibra óptica. Bennett e McLaughlin propuseram no ano de 1995 um protótipo de sensor à fibra óptica classificado como sensor quase-distribuído, capaz de monitorar a corrosão em grandes estruturas de aço [61]. O princípio de funcionamento desse protótipo, observado na Figura 3.11, é baseado no uso do OTDR que mede perdas por microcurvaturas em determinados trechos da fibra óptica que é presa por um anel metálico (Figura 3.12) que funciona como fusível. Quando o fusível corrói, eventualmente o anel é rompido. Isso permitirá que a fibra volte a se esticar. Com isso, a intensidade da luz refletida também é modificada. Como o anel é sensível à corrosão, devido à presença do meio externo, pode-se dizer que este sistema é capaz de observar a corrosão quando o anel é partido, o que caracteriza um sistema de dois níveis: 1) com anel (sem corrosão) e 2) sem anel (com corrosão) [61]. Além disso, esse instrumento de monitoramento de corrosão é considerado de baixo custo [61]. No entanto, a desvantagem de tal sistema é que ele é incapaz de monitorar de forma instantânea o processo de corrosão e também não determina a taxa de corrosão [61].

Fuhr e Huston propuseram no ano de 1998 uma aplicação de sensores de corrosão à base de fibra óptica em concretos de pontes e estradas [62]. A corrosão nessas estruturas foi constatada por pesquisadores norte-americanos observando a concentração de cloreto de sódio ( $NaCl$ )(sal) que era usado nas pistas dos Estados Unidos com o objetivo de evitar o congelamento delas. No entanto, o  $NaCl$  era diluído na água do gelo que por sua vez

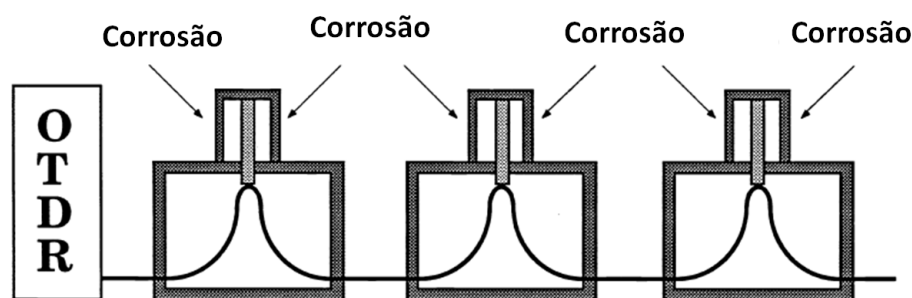


Figura 3.11: Esquema de funcionamento do sensor de corrosão através da perda por curvatura na fibra óptica [61].

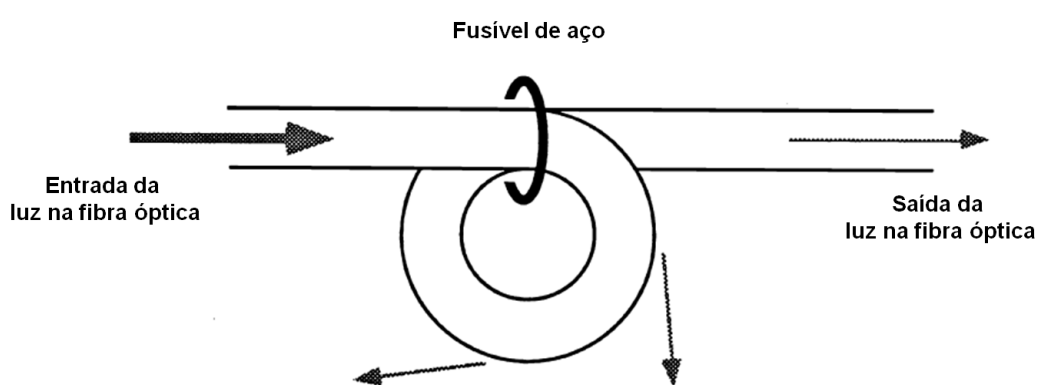
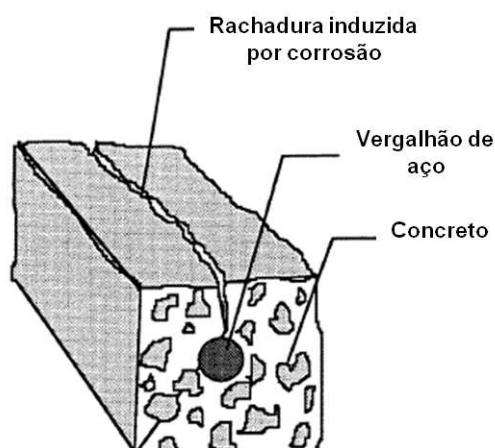


Figura 3.12: Perda por microcurvatura[61].

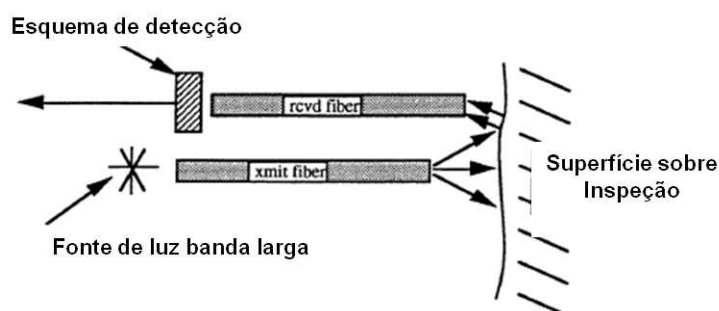
conseguia penetrar nas microfalhas do concreto assim provocando a corrosão na estrutura [62]. A Figura 3.13 mostra uma ilustração de concreto armado exposto à corrosão através da rachadura no concreto [62]. A corrosão no concreto é de 3 tipos: 1) corrosão generalizada (acontece em toda superfície do concreto), 2) corrosão localizada ou pontual (acontece em pontos isolados do concreto) e a 3) corrosão de tensão (provoca rachaduras como a vista na Figura 3.13) [62].

O processo de monitoramento da corrosão, usando o sistema óptico de fibra, é ilustrado na Figura 3.14 [62]. Esse sistema usa uma fonte de luz banda larga conectada à fibra óptica, em que a luz que se propaga através da fibra incide na superfície do material sob inspeção e é modulada através da reflexão e absorção da luz na superfície. A luz modulada retorna por outra fibra óptica que está conectada ao espectrômetro. Com isso, a cor da luz modulada observada no espectrômetro pode definir o tipo de estrutura da superfície e consequentemente determinar se a superfície do material sofreu o processo de corrosão [62]. Esse sensor óptico proposto por Fuhr é mais preciso do que o sensor proposto por Bennett [61] já que o sensor de Fuhr é capaz de determinar se o material está passando por um processo de



**Figura 3.13:** Ilustração da rachadura provocada pela corrosão [62].

corrosão, algo que não é possível de ser observado no sensor de Bennett [61]. Isso porque, no sensor de Bennett quando se tem a informação de que o material sofreu corrosão, essa já foi finalizada. Com isso, fica difícil efetuar uma intervenção no intuito de proteger o material da corrosão. No entanto, ambos os sensores não determinam a taxa de corrosão, que é um parâmetro importante para o monitoramento da corrosão.



**Figura 3.14:** Sensoriamento à fibra óptica por espectrometria [62].

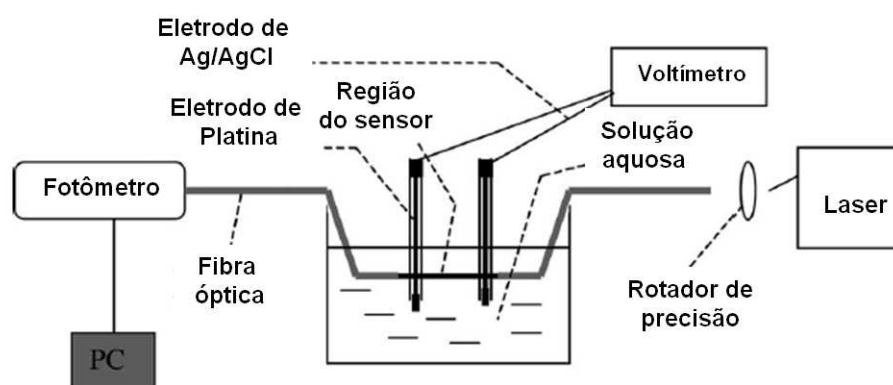
Benounis e colaboradores propuseram no ano de 2003 um sistema sensor de corrosão em que é depositado na superfície lateral do núcleo da fibra (região de detecção) um filme de Cobre (Cu) por eletrólise, como ilustrado na Figura 3.15 [14]. A Figura 3.15 também mostra o aparato experimental que usa técnicas ópticas e eletroquímicas para determinar a corrosão no filme de Cu.

O sistema óptico mostrado na Figura 3.15 consiste de um *laser* de diodo ( $\lambda = 670$  nm) acoplado ao rotator, fibra óptica com parte dela metalizada com Cu e o fotômetro (fotodiodo) para obtenção dos dados [14]. A fibra metalizada com Cu é exposta a uma solução



aquosa de ácido nítrico [14] e o monitoramento da corrosão desse metal é feito através da luz proveniente do *laser* que é acoplado a um rotador (parte móvel), em que essa parte móvel é acionada por um motor de passos controlado pelo computador (PC) (também usado para aquisição de dados) (Figura 3.15). O movimento de rotação promove variações de ângulos de incidência da luz na fibra óptica e conseqüentemente isso também influencia no ângulo de incidência na interface sílica-Cu. Sendo a potência da luz transmitida, que chega ao fotômetro, da interface sílica-Cu dependente do ângulo de incidência da luz nessa interface, é possível a partir disso analisar o processo de corrosão no tempo fazendo uma varredura com o ângulo de incidência da luz na fibra óptica [14].

Já o sistema eletroquímico possui dois eletrodos (Prata/Cloreto de Prata e Platina) posicionados em paralelo entre a fibra metalizada (Figura 3.15). Esses eletrodos são conectados a um voltímetro, que irá medir a variação do potencial eletroquímico devido à variação temporal da concentração do íon de cobre ( $Cu^{+2}$ ) na solução [14]. Essas técnicas são capazes de medir a taxa de corrosão do metal, dado que a espessura do metal é conhecida e o processo de corrosão é monitorado através do tempo de corrosão do metal [14].

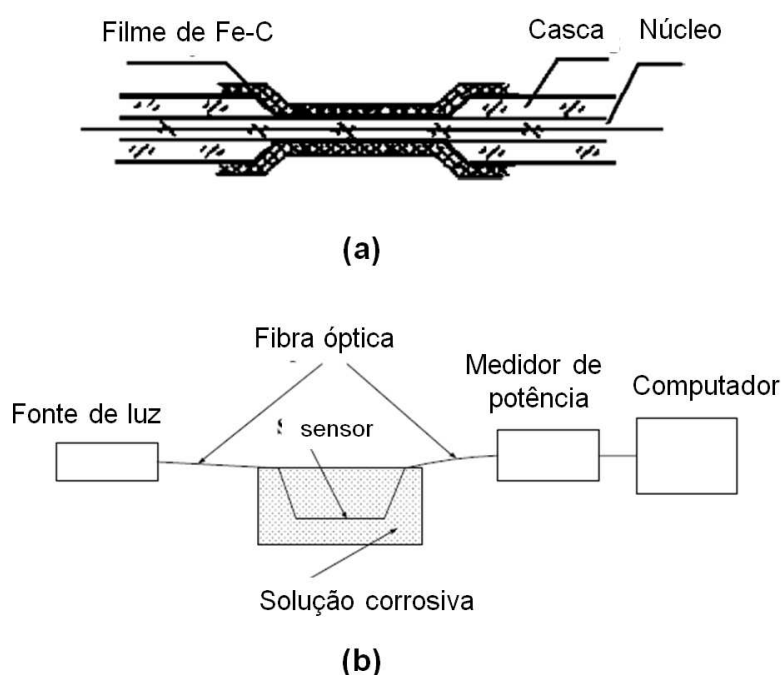


**Figura 3.15:** Sensor de corrosão usando técnicas óptica e eletroquímica [14].

No ano de 2004, usando o sensor apresentado na Figura 3.15, Benounis e Jaffrezic-Renaul desenvolveram um trabalho cujo objetivo era fazer um estudo sobre a corrosão do alumínio, que é um material bastante utilizado na estrutura de aeronaves civis e militares [15].

Saying e colaboradores propuseram no ano de 2006 um trabalho que apresenta técnicas de medição óptica e eletroquímica da corrosão numa liga composta por ferro e carbono (Fe-C) [16]. A Figura 3.16 (a) mostra um filme de Fe-C depositado na superfície lateral do núcleo da fibra óptica multimodo usada no experimento. A medida óptica é feita através

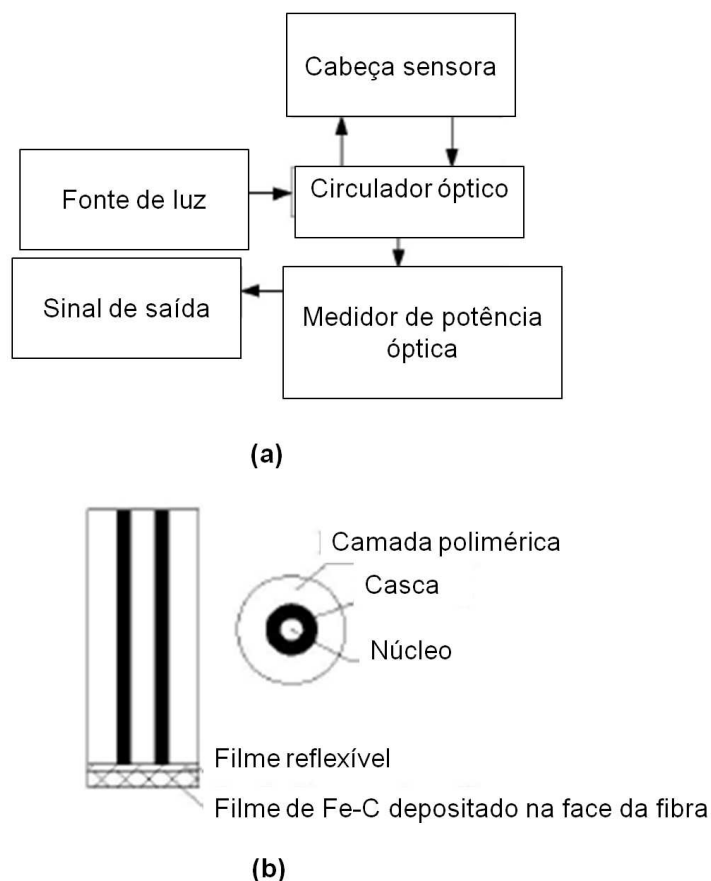
da reflexão interna total na interface núcleo-liga ao longo da fibra óptica. À medida que o filme metálico é exposto ao agente corrosivo (nesse experimento foi usado o ácido clorídrico ( $HCl$ )), o grau de absorção na liga metálica é alterado e com isso afetando o fator de transmissão ao longo da fibra óptica [16]. A Figura 3.16 (b) apresenta o aparato experimental para o monitoramento da corrosão. Esse sistema é capaz de determinar a taxa de corrosão do filme de Fe-C, porém ele é incapaz de medir a corrosão de forma seriada ao longo da fibra óptica, já que a medida depende da luz transmitida através da região que contém o filme metálico [16].



**Figura 3.16:** (a) Filme de Fe-C depositado na superfície lateral do núcleo da fibra óptica e (b) o aparato experimental para verificação do processo de corrosão do filme Fe-C [16].

Qiao e colaboradores propuseram também no ano de 2006 um sistema sensor de corrosão capaz de medir a taxa de corrosão. Este sistema também monitora um único ponto, como ilustra a Figura 3.17 (a). Ainda na Figura 3.17 (a), tem-se que o processo de medição da corrosão é feito pela técnica de OTDR, em que é possível verificar a intensidade da luz refletida no filme metálico em função do seu tempo de exposição ao agente corrosivo [12]. Na Figura 3.17 (b), tem-se o modo de deposição do filme de Fe-C na fibra óptica. Diferentemente do que foi visto na Figura 3.16 (a), o filme de Fe-C é depositado na face clivada do núcleo da fibra óptica.

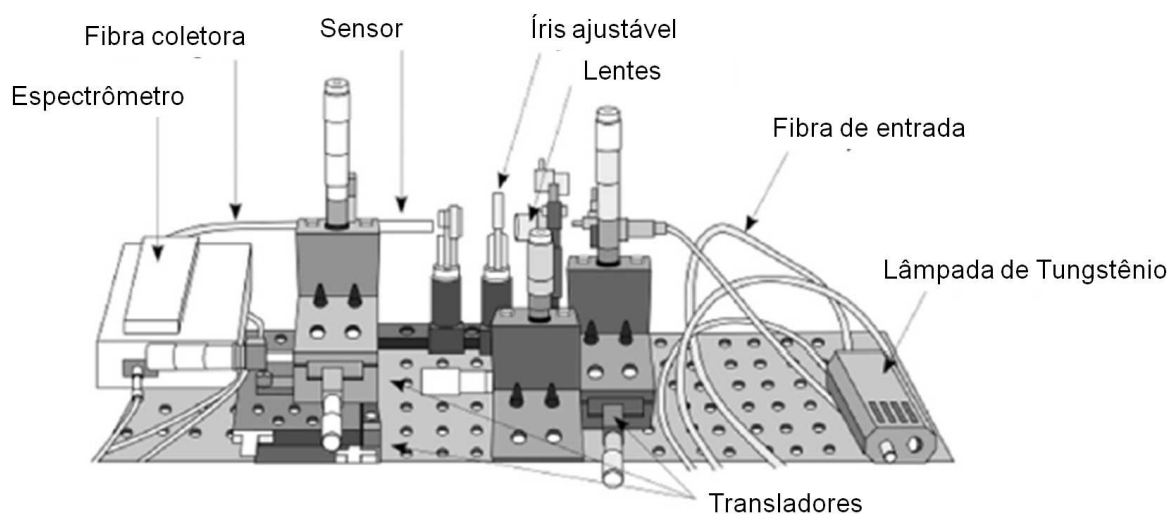
Cardenas-Valencia e colaboradores propuseram no ano de 2007 um sistema sensor que utiliza uma fibra óptica multimodo revestida com metal. A luz gerada por uma fonte



**Figura 3.17:** (a) Diagrama em bloco do sistema sensor e (b) o filme de Fe-C depositado na face clivada do núcleo da fibra óptica [12].

banda larga em comprimento de onda (lâmpada de Tugstênio) incide no núcleo dessa fibra óptica metalizada, como ilustra a Figura 3.18 [17]. Ainda na Figura 3.18, a medição da corrosão é feita através da propagação da luz por reflexão interna total ao longo da fibra óptica metalizada. À medida que o filme metálico é corroído, o sinal luminoso é menos absorvido pelo metal e com isso a luz se propaga com mais intensidade ao longo do núcleo da fibra óptica metalizada [17]. Contudo, a propagação da luz no núcleo da fibra é diferente para cada comprimento de onda. Assim um espectrômetro é colocado na saída da fibra coletora com o objetivo de analisar o comportamento da corrosão pela intensidade luminosa vista através de diferentes comprimentos de onda da luz incidente na fibra metalizada [17]. Apesar desse sistema sensor apresentar características semelhantes ao sistema sensor proposto por Saying, no que diz respeito à fibra revestida com metal e à medida feita através da luz transmitida na região da fibra óptica metalizada, este sistema sensor determina a taxa de corrosão [17].

Da Silva Jr. e colaboradores publicaram no serviço de patentes dos Estados Unidos no ano de 2007 um sensor capaz de verificar a quantidade de hidrogênio no ambiente [63].

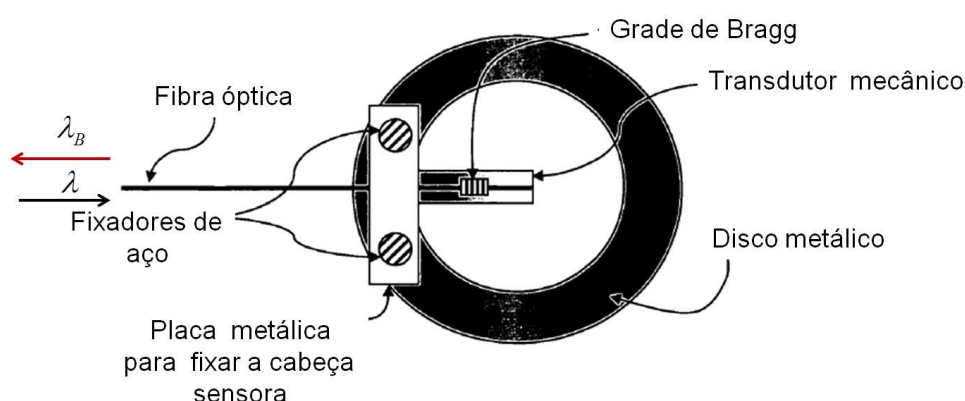


**Figura 3.18:** *Aparato experimental para medição da corrosão através da espectrometria [17].*

Com isso, o sensor de pH é capaz de informar de forma indireta possíveis processos de corrosão em estruturas metálicas expostas a tal ambiente [63]. Esse sistema sensor é utilizado pela Petrobrás com objetivo de acompanhar a concentração de hidrogênio ao longo dos dutos metálicos de petróleo e gás. A geração de hidrogênio no ambiente (oceano) onde são colocados os dutos de petróleo pode ser influenciada por efeitos químico, térmico e biológico (concentração de microorganismos) [63].

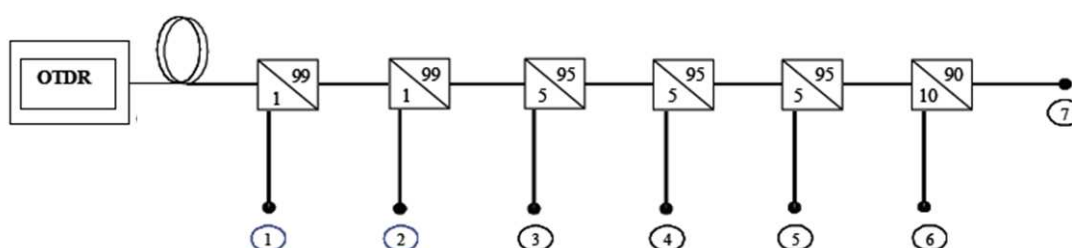
O princípio de funcionamento do sensor de pH é através da modulação do índice de refração numa fibra de grade de Bragg [63]. Nesse caso a interação do hidrogênio com o transdutor mecânico (formado por um polímero sensível ao hidrogênio) acoplado à fibra de Bragg faz com que seu volume seja alterado e através dessa variação tem-se a mudança do comprimento de onda de Bragg,  $\lambda_B$ , que medido através da luz que é refletida na grade de Bragg, como ilustrado na Figura 3.19 [63]. A cabeça sensora na Figura 3.19 é fixada em uma peça metálica que, por sua vez, é conectada ao duto metálico [63].

Ainda no ano de 2007, Martins-Filho e colaboradores propuseram um esquema de monitoramento de corrosão, visto na Figura 3.20, que pode ser classificado como um sensor de fibra óptica quase-distribuído, já que utiliza a técnica OTDR para analisar a corrosão em pontos discretos (multipontos) numerados de 1 até 7. Esses pontos discretos são prolongações de fibras ópticas monomodo onde, na face clivada dessas fibras, são depositados filmes metálicos usando a técnica de evaporação térmica. Quando esses filmes são expostos ao agente corrosivo, a espessura diminui ao ponto dessa variação de espessura ser observada através da luz refletida, devido aos efeitos de interface (fibra óptica - metal - meio externo),



**Figura 3.19:** Sensor de pH à base de fibra óptica fixada numa peça metálica [63].

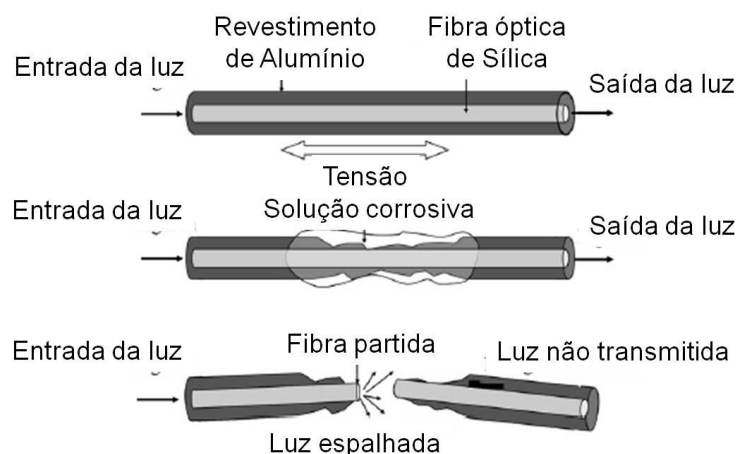
no OTDR. Assim como o sensor de corrosão apresentado por Bennett, ele pode ser classificado como um sistema de baixo custo e, além disso, capaz de monitorar a corrosão a longas distâncias e em pontos estratégicos [4].



**Figura 3.20:** Esquema do sensor de corrosão multiponto à base de fibra óptica monomodo [4].

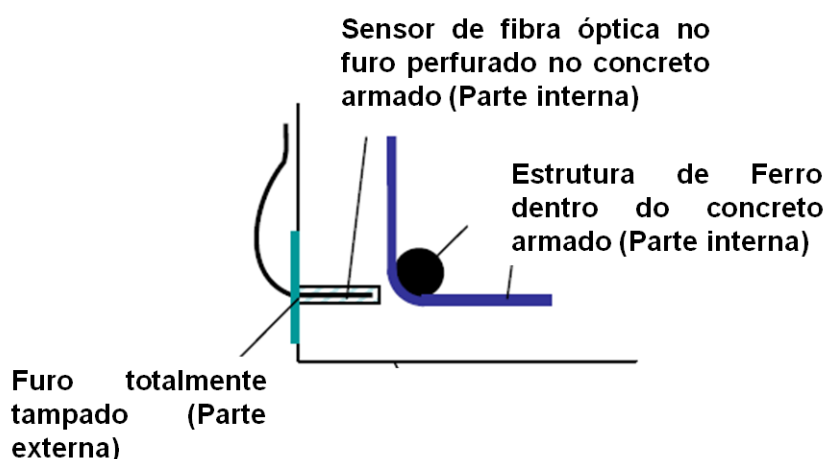
Wade e colaboradores propuseram no ano de 2008 um sensor cujo princípio de funcionamento é destacado na Figura 3.21 [13]. Nessa figura tem-se uma fibra óptica com o núcleo revestido com Alumínio e um sinal óptico se propagando no núcleo da fibra óptica. Assim, como o sistema de Bennett [61], o sistema sensor de Wade também é um sistema de dois níveis para medidas de corrosão [13]. Nesse caso quando a solução corrosiva corrói todo metal que reveste o núcleo da fibra, o núcleo fica vulnerável a diversos agentes externos e, com isso, possibilita a quebra da fibra óptica. Como consequência, o sinal óptico transmitido até a outra extremidade da fibra óptica é perdido (Figura 3.21). Nessa condição é dito que o metal foi totalmente corroído [13].

Leung e colaboradores também propuseram no ano de 2008 um trabalho que tem grande impacto na construção civil, já que esse sensor monitora a corrosão nas estruturas de ferro colocadas dentro do concreto armado [64]. Ainda de acordo com Leung, os agentes



**Figura 3.21:** Princípio de funcionamento do sensor de corrosão de Wade [13].

que provocam a corrosão da estrutura de ferro são o cloro e o dióxido de carbono. Esses elementos, vindos do meio externo, conseguem penetrar no concreto armado e atacar a estrutura de ferro. O princípio de monitoramento da corrosão, descrito por Leung, é semelhante ao sistema proposto por Martins-Filho e colaboradores, em que é depositada uma certa espessura de metal na face da fibra óptica, que no caso do Leung foi o ferro, e através da técnica OTDR é possível verificar a taxa de corrosão do ferro pela diminuição da espessura do filme. A Figura 3.22 mostra o sensor óptico colocado dentro do concreto armado próximo à estrutura de ferro [64].



**Figura 3.22:** Esquema de instalação do sensor de corrosão para monitoramento das estruturas de Ferro dentro do concreto armado [64].

Em resumo, a Tabela 3.1 apresenta as características básicas dos sensores de corrosão à fibra óptica citados nesta seção. Pela tabela, observa-se que muitos dos sensores são

monopontos e uma parcela pequena desses sensores são do tipo extrínseco e multiponto. Os sensores do tipo monoponto em sua maioria são capazes de obter a taxa de corrosão, que é um parâmetro importante na caracterização do processo de corrosão. Além disso, esses sensores são de longo alcance, da ordem de dezenas de quilômetros. O único sensor do tipo extrínseco apresentados na Tabela 3.1 é de curto alcance e através dele não é possível obter a taxa de corrosão. Os sensores do tipo multiponto apresentados na Tabela 3.1 são de longo alcance, porém apresentam características distintas com relação a obtenção da taxa de corrosão. Com isto pode-se dizer que o sistema apresentado por Martins-Filho e colaboradores leva vantagem em relação ao sistema proposto por Bennett, isto porque um é capaz de medir a taxa de corrosão e o outro não. Com exceção do sensor de pH, nenhum sensor apresentado na Tabela 3.1 é capaz de medir o pH do meio corrosivo.

**Tabela 3.1:** Características dos sensores de corrosão à fibra óptica.

<b>Autores</b>	<b>Tipo de sensor</b>	<b>Deteção</b>	<b>Alcance</b>	<b>Taxa de corrosão</b>	<b>pH</b>
Bennett[61]	Multiponto	OTDR	Longo	Não	Não
Fuhr[62]	Extrínseco	Espectroscopia	Curto	Não	Não
Benounis[13,14]	Monoponto	Transmissão	Longo	Sim	Não
Saying[16]	Monoponto	Transmissão	Longo	Sim	Não
Qiao[12]	Monoponto	Reflexão	Longo	Sim	Não
Cardenas-Valencia[17]	Monoponto	Transmissão	Longo	Sim	Não
Da Silva Jr.[63]	Monoponto	Reflexão	Longo	Não	Sim
Martins-Filho[4]	Multiponto	OTDR	Longo	Sim	Não
Wade[13]	Monoponto	Transmissão	Longo	Não	Não
Leung[64]	Monoponto	OTDR	Longo	Sim	Não

# CAPÍTULO 4

## SISTEMA OTDR AMPLIFICADO PARA MONITORAMENTO MULTIPONTO DE CORROSÃO

Neste capítulo são abordados os resultados experimentais do sistema sensor amplificado de corrosão que emprega um amplificador de fibra dopada com Érbio (EDFA - *Erbium Doped Fiber Amplifier*) para conseguir aumentar o alcance de monitoramento do sistema. Os resultados mostram as vantagens do sistema amplificado, em termos do alcance e da resolução espacial, quando comparados ao sistema não-amplificado. Este é o primeiro trabalho sobre a caracterização experimental de sistemas amplificados usando OTDR para aplicações em sensores de corrosão, e também o primeiro a avaliar a sensibilidade das medições a variações de ganho do amplificador. A Seção 4.1 apresenta a introdução deste capítulo. Na Seção 4.2, é abordada a caracterização do sensor óptico amplificado. Na Seção 4.3, são mostradas as medidas de corrosão feitas no sistema amplificado. Na Seção 4.4, são apresentadas as conclusões deste capítulo.

### 4.1 Introdução

Martins-Filho e colaboradores apresentaram pela primeira vez o conceito e os resultados experimentais de um sensor de fibra óptica baseado em corrosão utilizando OTDR [4, 6]. Este sensor consiste de várias cabeças sensoras conectadas a um OTDR comercial por



fibra óptica monomodo e acopladores de fibra. Os acopladores separam uma pequena fração da luz para as cabeças sensoras. A cabeça sensora é constituída por uma fibra clivada, onde um filme metálico é depositado.

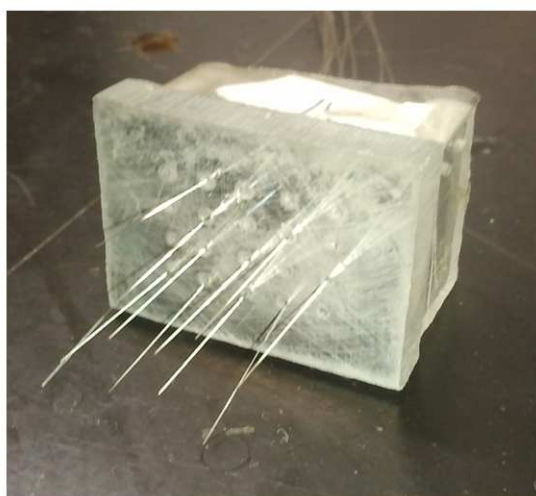
O metal usado por Martins-Filho e também nesta tese para o estudo do processo de corrosão é o alumínio (Al). A escolha do Al se deve a três motivos: *i*) a sua grande aplicação na proteção de estruturas e peças metálicas na indústria de Petróleo e Gás [7] como metal de sacrifício, *ii*) a facilidade de evaporação térmica do alumínio em fibra óptica e *iii*) a facilidade de trabalhar em laboratório com este metal, já que sua taxa de corrosão é bem definida para o ácido utilizado no processo de corrosão e não é necessário o uso de um ambiente exclusivo para trabalhar com esse ácido.

A deposição do Al é feita através da técnica de evaporação térmica. Essa deposição foi realizada no Departamento de Física da UFPE com a evaporadora térmica da marca Variary - 3195 (Figura 4.1(a)) a uma pressão de vácuo de aproximadamente  $5 \times 10^{-6}$  Torr e a uma taxa de deposição de 0,6 Å/s. A quantidade de Al depositado é registrada pelo sensor constituído por um material piezoelétrico (transdutor) sensível à variação de massa depositada. Este sensor fica na camara de vácuo juntamente com as fibras ópticas e sua localização é no teto da camara. A espessura do filme de Al, na face clivada da fibra óptica registrada pelo sensor da evaporadora, foi de 40 nm. A Figura 4.1(b) ilustra um conjunto de fibras ópticas presas num suporte de plástico com graxa de silicone. Nessas fibras ópticas foram depositadas Al em suas faces clivadas.

Em laboratório é usado como agente corrosivo o *Al-etcher* cuja composição química é  $25H_3PO_4 : 1HNO_3 : 5CH_3COOH$  [65]. O *Al-etcher* é bastante utilizado no processo de micro fabricação de dispositivos em que o ácido nítrico ( $HNO_3$ ) atua agilizando a oxidação do alumínio gerando o óxido de alumínio ( $Al_2O_3$ ). Já o ácido fosfórico ( $H_3PO_4$ ) atua removendo o  $Al_2O_3$  e, por fim, o ácido acético ( $CH_3COOH$ ) tem o papel de estabilizar o pH (potencial de hidrogénio iónico) ácido da solução e com isso definir a taxa de corrosão do Al a uma certa temperatura [66,67]. A taxa de corrosão para o Al à temperatura ambiente (aproximadamente 25 °C) é de 50 nm/min [65]. Com a taxa de corrosão de Al conhecida também é possível utilizar o sistema sensor de corrosão proposto por Martins-Filho para determinar a espessura do filme de Al depositado na fibra óptica. O resultado disso foi uma espessura de 39 nm, para várias pontas metalizadas com Al, o que corresponde a um erro de aproximadamente 2,5% em comparação com o valor obtido pelo sensor da evaporadora térmica. Isso mostra que esse sistema sensor de corrosão é capaz de caracterizar a taxa de corrosão de um determinado meio corrosivo com confiabilidade.



(a)



(b)

**Figura 4.1:** Em (a), tem-se a evaporadora térmica da marca Variary. Já em (b), tem-se um conjunto de pontas depositadas com Al.

Ainda no sistema sensor de Martins-Filho, tem-se que à medida em que o filme metálico é removido, devido à corrosão, a luz refletida medida no OTDR diminui. Como foi dito na Seção 3.4, esse sensor é multiponto, auto-refenciado e pode detectar os níveis de corrosão a vários quilômetros de distância a partir do equipamento OTDR [6]. No entanto, o alcance do sistema é limitado, pela faixa dinâmica do OTDR, devido às perdas de inserção dos acopladores ópticos e às perdas na fibra [6].

Amplificadores ópticos são utilizados em sistemas de comunicação óptica para obter alta capacidade de transmissão de dados a longas distâncias [68]. Esses sub-sistemas são capazes de amplificar o sinal óptico, que foi atenuado ao longo da fibra. Entre as diversas tecnologias de amplificação óptica, o EDFA é o mais procurado para diferentes aplicações [68]. O EDFA pode fornecer amplificação na faixa espectral de 1530 a 1560 nm (faixa de

transmissão de dados usada pelas empresas de telecomunicações) [68] e há muitos relatos de seu uso junto com o OTDR para aplicações em sensores [69–71]. Além das vantagens citadas sobre o uso do EDFA, pode-se dizer que sua procura também está associada ao fato de que não precisa de partes eletrônicas para a amplificação do sinal (sistema puramente óptico) para amplificar o sinal óptico, como é o caso dos regeneradores eletrônicos que precisam converter o sinal óptico em elétrico para poder amplificar o sinal e depois converter novamente em sinal óptico [68]. Esses regeneradores eletrônicos além de serem mais caros do que o EDFA, têm baixa eficiência de transmissão do sinal óptico e são de difícil instalação no sistema óptico quando comparado com o EDFA [68].

## 4.2 Caracterização do sensor óptico amplificado

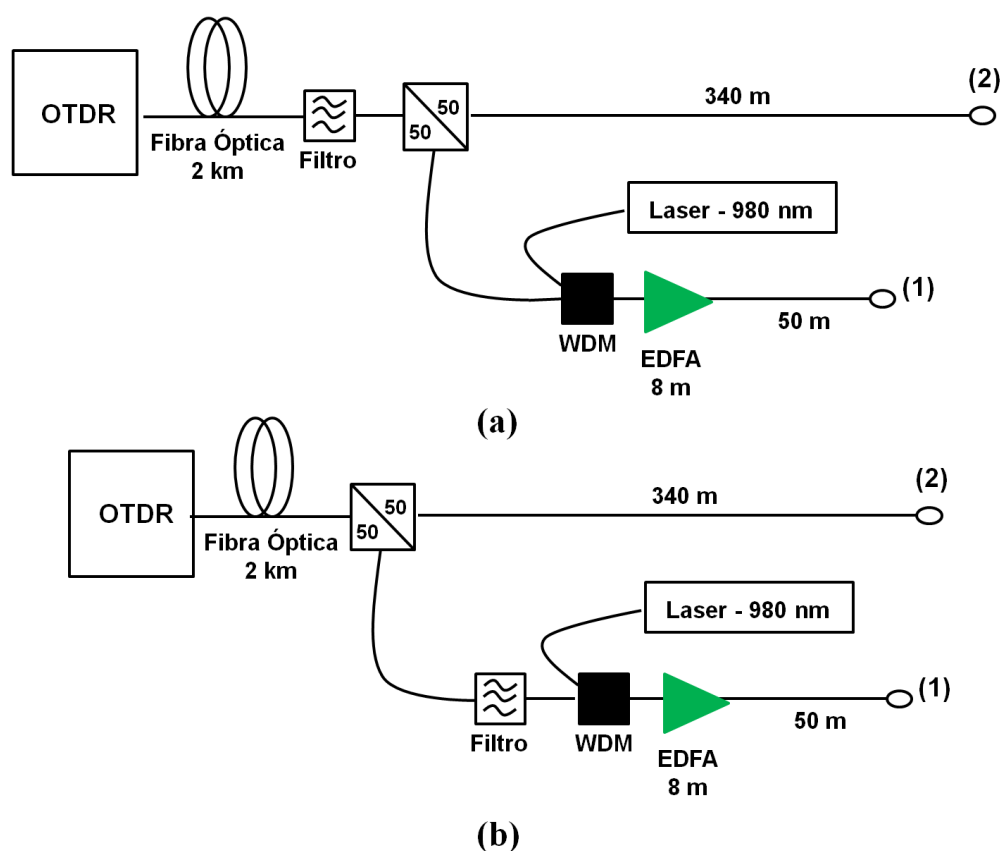
A caracterização do sensor óptico amplificado é destacada através do ganho do EDFA usando OTDR, como também o aumento do alcance do sistema sensor amplificado quando comparado ao sistema sensor não-amplificado. Essa caracterização é importante para compreender os resultados apresentados na Seção 4.3, onde se observa o monitoramento da corrosão do filme metálico num sistema sensor à base de fibra óptica amplificado e não-amplificado usando o OTDR.

### 4.2.1 Caracterização do ganho do EDFA usado no sistema sensor óptico

A caracterização do ganho do EDFA, que tem 8 m de comprimento de fibra dopada com Érbio (3M modelo FS-ER-7A28)(EDF - *Erbium Doped Fiber*), é feita através dos aparatos experimentais apresentados na Figura 4.2. A Figura 4.2(a) mostra o esquema para medir o ganho do EDFA usando OTDR, que gera pulsos de luz com comprimento de onda ( $\lambda$ ) centrado em  $1,55 \mu\text{m}$ . A medida do ganho no EDFA é obtida pela diferença (em dB) dos sinais do OTDR nos pontos de referência 1 e 2. Cada ponto de referência consiste de uma fibra clivada e a diferença de comprimento dos braços 1 e 2 não proporciona atenuação do sinal óptico de forma apreciável. Isso por que, a atenuação da fibra é de 0,2 dB/km para o comprimento de onda do pulso luminoso usado no experimento. A reflexão no ponto 1, medida pelo OTDR, é afetada pelo ganho do EDFA, enquanto a reflexão no ponto 2 não é modificada. Portanto, o sinal do OTDR no ponto 2 pode ser utilizado como nível de referência para medir o ganho do EDFA no sinal do ponto 1. A Figura 4.2(b) é um sistema ligeiramente diferente, que é utilizado para medir o ganho líquido do EDFA com o filtro. A largura de banda a meia altura (FWHM - *Full Width at Half Maximum*) desse filtro é 1 nm. O

uso do filtro no esquema do sensor amplificado é importante porque ele evita a saturação do detector do OTDR devido à emissão espontânea amplificada (ASE - *Amplified Spontaneous Emission*) gerada pelo EDFA [49, 72, 73]. Apesar disso, o filtro também atenua o sinal do OTDR, já que a FWHM do filtro é menor do que a largura de linha do pulso do OTDR que é 10 nm. Por isso, é importante verificar se a introdução do EDFA com o filtro pode produzir um ganho líquido razoável (ganho do EDFA menos a perda no filtro) para o sistema.

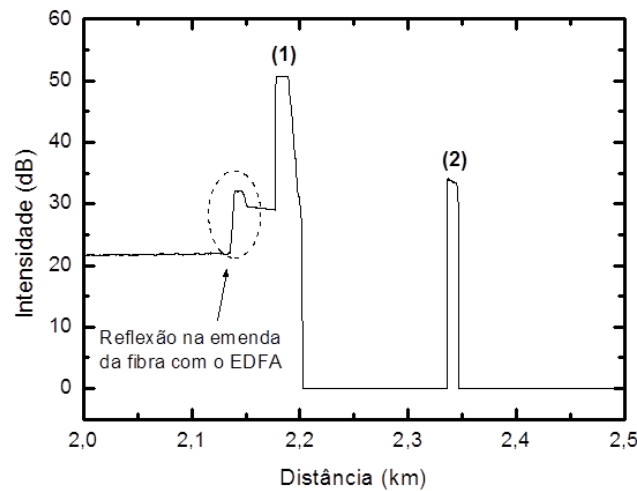
Os parâmetros do OTDR usados nos esquemas da Figura 4.2 são de 5 km de distância, 30 varreduras (médias) e o comprimento de onda de 1550 nm.



**Figura 4.2:** Esquemas de caracterização do ganho do EDFA (a) apenas o EDFA e (b) o ganho líquido.

A Figura 4.3 mostra um traçado típico do OTDR para a largura de pulso de 100 ns obtido a partir dos esquemas apresentados na Figura 4.2. Na Figura 4.3, as reflexões dos pontos 1 e 2 para potência de bombeio de 23,20 mW no sistema apresentado na Figura 4.2 (a). Além disso, Figura 4.3 também mostra um pico menor devido à reflexão da emenda da fibra óptica com o EDFA.

Um fato interessante que aparece nos resultados experimentais do sensor amplificado usando o OTDR é que durante o processo de amplificação do sinal óptico proveniente do OTDR, a luz refletida devido ao espalhamento Rayleigh na fibra óptica não é mais observada



**Figura 4.3:** Traço do OTDR para a configuração experimental da Figura 4.2 (a) usado para caracterizar o ganho do EDFA, para uma potência de bombeio de 23,2 mW.

pelo detector do OTDR e são observados apenas o pico devido à luz refletida na interface (sílica-meio externo) em determinada posição e o nível de base do sinal refletido na interface vai a zero, como ilustrado no pico (2) do gráfico na Figura 4.3. Acredita-se que isto pode ser devido à potência do ruído ASE gerado pelo EDFA, que oculta a potência retroespalhada na fibra óptica para cabeças sensoras mais distantes do OTDR. Contudo, não se sabe a causa que leva o OTDR a processar tal resultado.

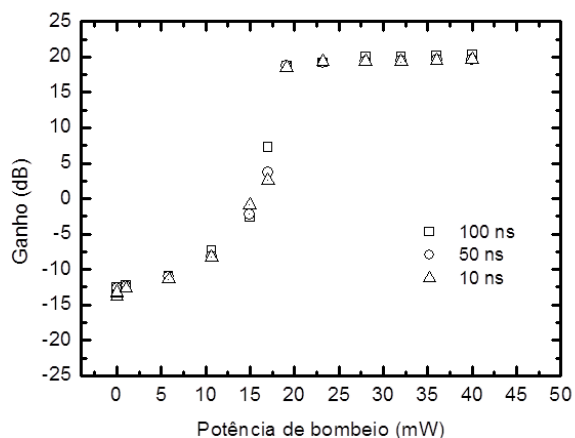
A Figura 4.4 mostra o ganho do EDFA, como função da potência de bombeio, obtido a partir da diferença (em dB) do sinal do OTDR nos pontos 1 e 2. Ainda na Figura 4.4, tem-se os valores do ganho para diferentes larguras de pulso (10, 50 e 100 ns) do OTDR. A resolução espacial do OTDR, ( $\Delta z$ ), que é a capacidade do OTDR em distinguir dois eventos consecutivos ao longo da fibra óptica, pode ser obtida teoricamente através da Equação 4.1, válida para pulsos retangulares [74],

$$\Delta z = \frac{cT_p}{2n_g}. \quad (4.1)$$

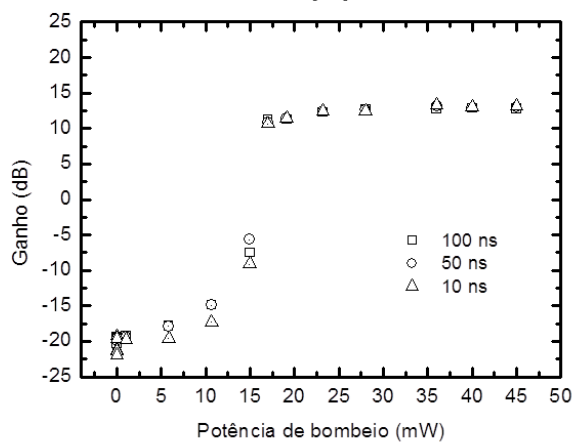
Além disso, a resolução espacial do OTDR define a zona morta (regiões localizadas na fibra óptica, onde o OTDR não consegue monitorar o evento) [74, 75]. Assim, considerando as diferentes larguras de pulso do OTDR e os parâmetros  $n_g = 1,468$  (índice de refração de grupo na sílica para o comprimento de onda de  $1,55 \mu\text{m}$ ) e  $c \simeq 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$  (velocidade da luz no vácuo), tem-se que as resoluções espaciais do OTDR são 1,02 m, 5,1

m e 10,2 m. Logo, pode-se dizer que quanto menor for a largura do pulso melhor será a resolução espacial do OTDR [74, 75].

As variações de largura pulso observadas na Figura 4.4 foram feitas para verificar se há variação de ganho na saturação do EDFA [76]. No entanto, não foi observada nenhuma alteração significativa neste sentido.



(a)



(b)

**Figura 4.4:** Os gráficos do ganho em função da potência de bombeio: (a) Ganho bruto e (b) ganho líquido para diferentes larguras de pulso do OTDR.

O ganho na Figura 4.4 aumenta à medida que a potência de bombeio também aumenta. Ele parte de valores negativos (absorção no EDF) para valores positivos (amplificação do EDF), como esperado, atingindo um valor máximo de aproximadamente 20 dB na Figura 4.4(a) para o esquema da Figura 4.2(a) e 12 dB na Figura 4.4(b) para o esquema da Figura 4.2(b). Esses resultados indicam que o EDFA produz 20 dB de ganho para valores de potência de bombeio acima de 20 mW e o filtro introduz perda de 8 dB, o que resulta num ganho

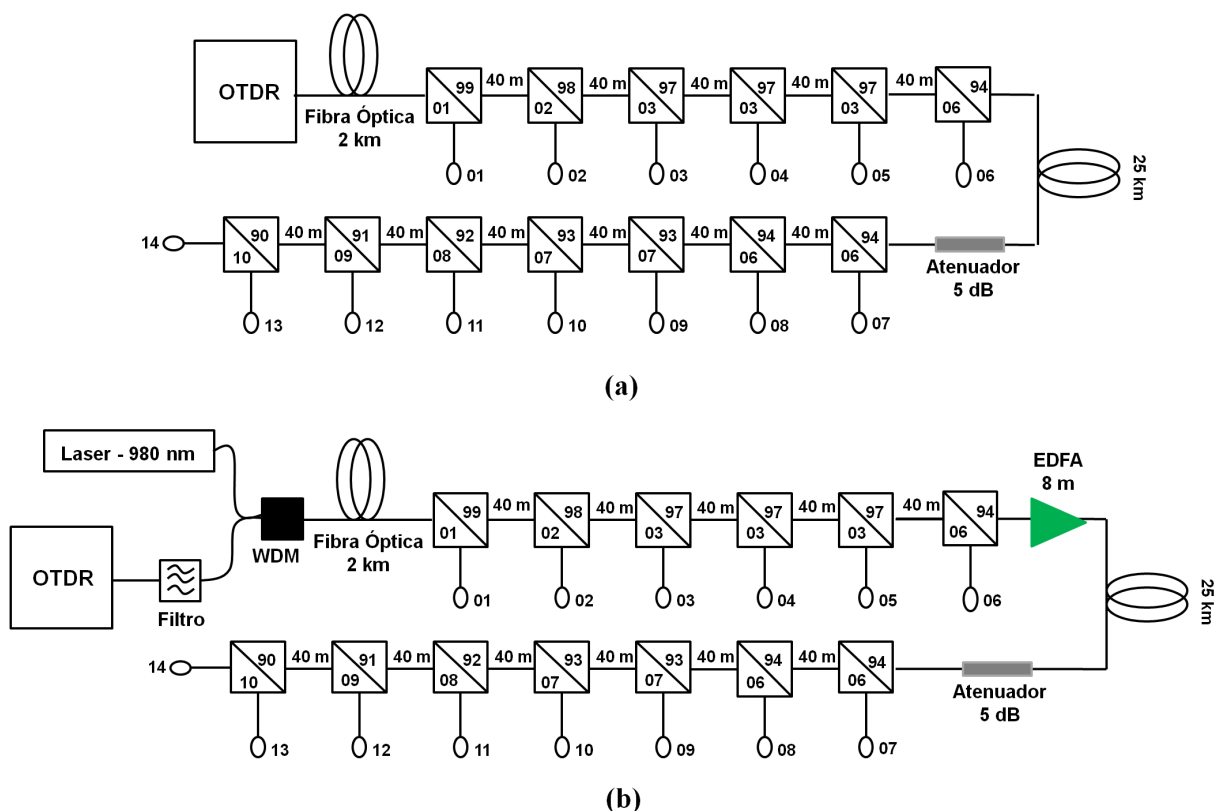
líquido de 12 dB que é registrado pelo detector do OTDR.

#### 4.2.2 Aumento da distância de monitoramento do sistema sensor óptico amplificado

A Figura 4.5(a) mostra o sistema sensor multiponto com 14 cabeças sensoras, numeradas de 1 até 14. Ele consiste de um OTDR operando no comprimento de onda de  $1,55 \mu\text{m}$ , conectado a uma fibra monomodo padrão de 2 km de comprimento, alguns acopladores direcionais, uma fibra monomodo padrão adicional de 25 km de comprimento e um atenuador de 5 dB. Os acopladores dividem o sinal óptico emitido pelo OTDR para que uma pequena fração (1-10%) seja direcionada para as cabeças sensoras. As pontas das fibras, que formam as cabeças sensoras, são clivadas. Com isso, os sinais refletidos pelas cabeças sensoras são detectadas pelo OTDR como picos no traço do OTDR. Os 25 km de fibra óptica e o atenuador de 5 dB, que representa 25 km de fibra óptica para o comprimento de onda de  $1,55 \mu\text{m}$ , são colocados entre a sexta e a sétima cabeça sensora para simular uma situação em que se tem um primeiro conjunto de cabeças sensoras próximas ao OTDR e um outro conjunto de cabeças sensoras muito distante do OTDR. Esta é uma situação típica em que a distância e a perda dos acopladores podem limitar o alcance do sistema, o que torna mais difícil a obtenção dos resultados para as cabeças sensoras no final do sistema.

A Figura 4.5(b) mostra uma versão amplificada do sistema sensor apresentado na Figura 4.5(a). Um EDFA é colocado depois da sexta cabeça sensora para amplificar o sinal óptico do OTDR. O EDFA é remotamente bombeado por um laser multimodo de 980 nm que é inserido no sistema, próximo ao OTDR, por um acoplador WDM. Verificou-se que a perda de inserção dos acopladores no comprimento de onda do laser de bombeio é pequena, porém a atenuação é de 0,78 dB/km na fibra óptica padrão, de forma que para 100 mW de potência de bombeio na saída do laser, apenas 17 mW alcança o EDFA. Somente os sinais da cabeça sensora após o EDFA (cabeças 7 a 14) são amplificados. A Figura 4.5(b) mostra também o esquema do sistema com o filtro (caracterizado na Seção 4.2.1) conectado em série com o OTDR. Esse filtro é ajustado para o comprimento de onda do OTDR e é utilizado, como já foi dito, para reduzir a ASE gerada pelo EDFA que entra no OTDR, o que pode provocar a saturação no detector do OTDR. O ganho líquido (ganho do EDFA menos as atenuações do filtro e dos acopladores) para potência de bombeio de 17 mW na entrada do EDFA é 10 dB, de acordo com os resultados experimentais ilustrados na Figura 4.6.

A Figura 4.6 apresenta os traços do OTDR obtidos do aparato experimental mostrado na Figura 4.5(a) (linha preta) e também do aparato da Figura 4.5(b) (linha vermelha) para larguras temporais de 10, 50 e 100 ns do OTDR. Nos gráficos da Figura 4.6, o lado esquerdo

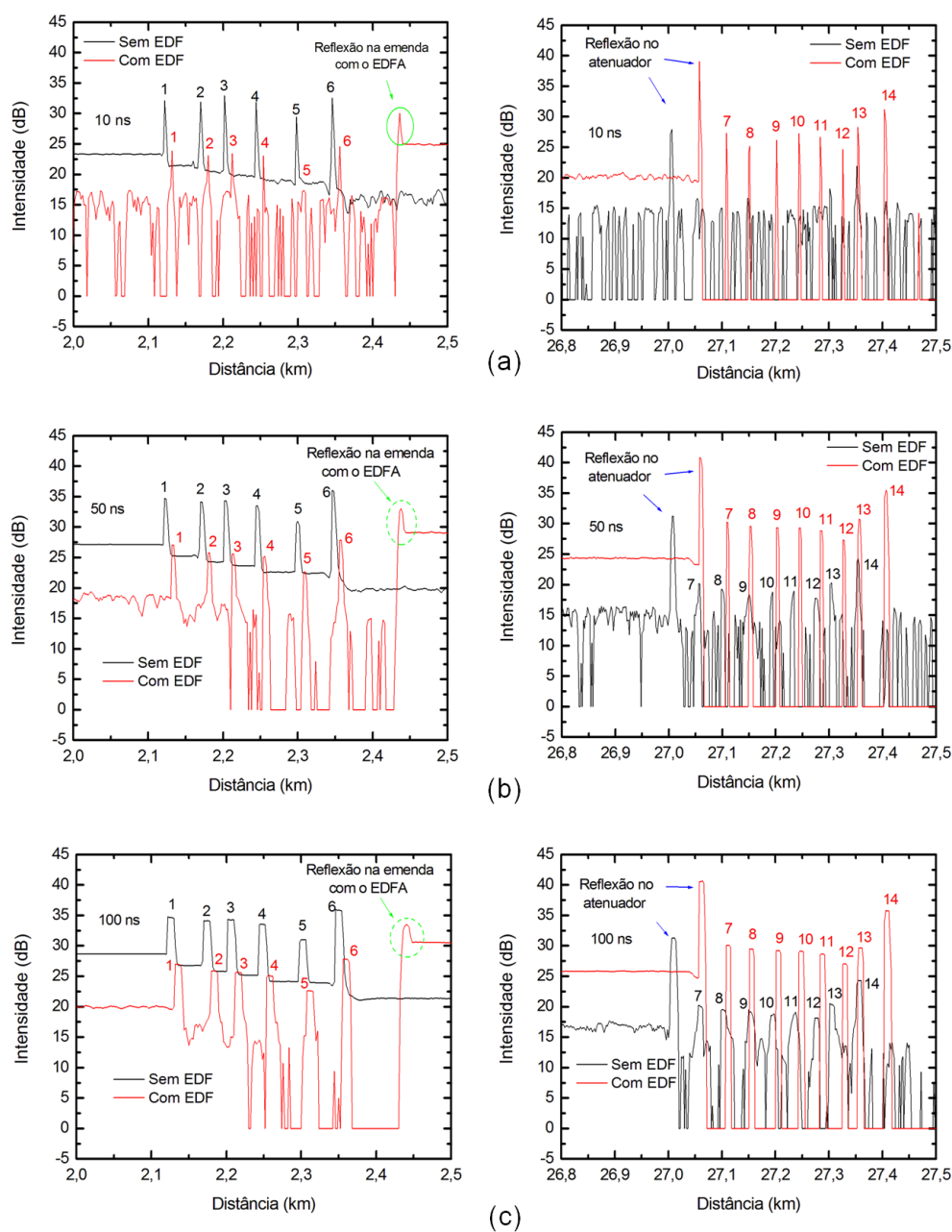


**Figura 4.5:** Esquema do sensor multiponto (a) sem e (b) com amplificação.

tem seis picos correspondentes às seis primeiras cabeças sensoras do sistema, enquanto o lado direito mostra as oito cabeças sensoras restantes do sensor, numeradas como na figura 4.5. Picos adicionais podem ser vistos devido às reflexões na interface entre diferentes fibras ou devido ao atenuador óptico inserido no sistema. Note que as seis primeiras cabeças sensoras não são amplificadas, portanto apenas observa-se a atenuação devido ao filtro passa-banda no sistema amplificado (Figura 4.5(b)). Isso explica porque eles apresentam traços de menor intensidade no esquema amplificado em relação ao esquema não-amplificado. Por outro lado, o comportamento oposto pode ser observado nas oito últimas cabeças sensoras, isto é, o esquema amplificado apresenta os traços de maior intensidade, uma vez que as cabeças sensoras experimentam o ganho do EDFA.

A Figura 4.6 (a) mostra que para a largura temporal de 10 ns, o sistema sensor não consegue distinguir os picos das cabeças de número 7 a 14 do ruído de base. Essas cabeças sensoras estão abaixo do alcance do sistema, que depende da faixa dinâmica do OTDR. No entanto, no sistema amplificado, para as mesmas condições experimentais, pode-se ver claramente os picos das oito últimas cabeças sensoras do sistema. Esta é uma indicação de que o uso de um EDFA pode estender o alcance do sistema OTDR. O aumento real no





**Figura 4.6:** Traços do OTDR do sistema sensor multiponto amplificado (linha vermelha) e não-amplificado (linha preta) para diferentes larguras de pulso (a) 10 ns, (b) 50 ns e (c) 100 ns.

alcance do sistema depende da perda de inserção de cada elemento do sistema (acopladores e fibra óptica).

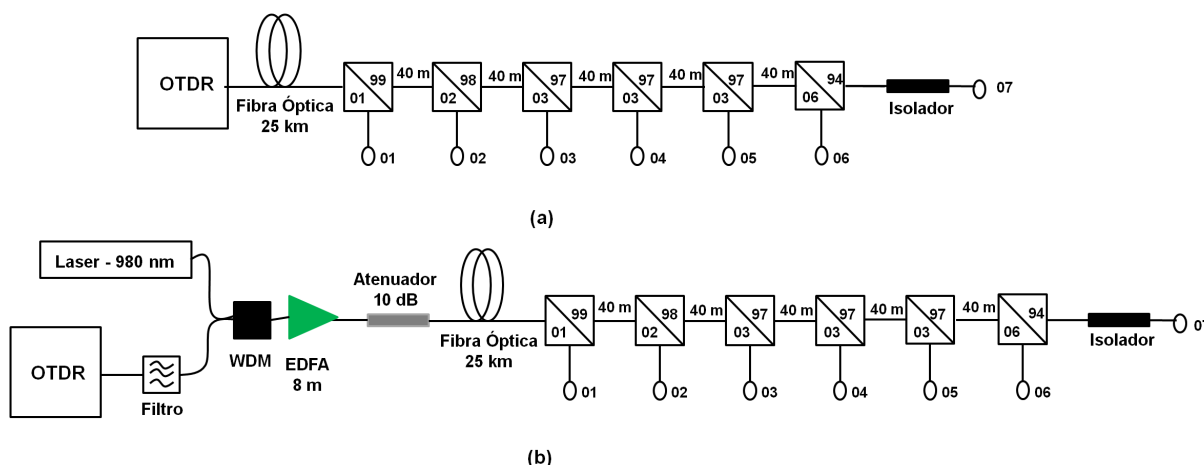
As Figuras 4.6 (b)-(c) mostram um experimento similar mas com o OTDR ajustado para produzir pulsos de 50 e 100 ns. Com o objetivo de evitar efeitos não-lineares na fibra óptica, o OTDR ajusta a potência do pulso óptico através da energia do pulso e de sua largura [75]. Assim, tem-se que quanto maior for a largura do pulso, maior será a potência

óptica do pulso [75]. Isso também implica numa faixa dinâmica do OTDR mais elevada e consequentemente o sistema tem um alcance mais longo [75]. No entanto, os pulsos mais largos também implicam numa pior resolução espacial dos traços do OTDR [54, 75]. De fato, ao contrário do caso dos pulsos de 10 ns, nesta situação, os picos numerados de 7 a 14 podem ser observados logo acima do ruído de base (aproximadamente 15 dB), mesmo no experimento não-amplificado. O traço do OTDR amplificado mostra esses picos elevados de 10 dB em relação ao traço do experimento não-amplificado.

### 4.3 Medidas de corrosão com o sistema óptico amplificado

A fim de verificar os efeitos do esquema de amplificação e as variações de ganho do EDFA, nos resultados de monitoramento da corrosão, configuram-se os esquemas mostrados na Figura 4.7. Essa figura mostra um sistema sensor de corrosão multiponto sem (Figura 4.7 (a)) e com (Figura 4.7 (b)) amplificação. Diferentemente da configuração mostrada na Figura 4.5 (b), em que o amplificador é colocado na linha entre as cabeças sensoras, na Figura 4.7 (b) o amplificador é colocado próximo ao OTDR, como reforço para seu sinal, antes das cabeças sensoras. Na configuração da Figura 4.7 (b) foi colocado 25 km de fibra óptica entre as cabeças sensoras e o OTDR juntamente com o EDFA. Também foi colocado um isolador na extremidade do sistema (cabeça sensora 7) a fim de evitar a reflexão de volta para o OTDR, o que pode causar a saturação do OTDR, e também um atenuador de 10 dB no sistema amplificado (Figura 4.7(b)) para evitar a saturação do OTDR, devido às altas intensidades refletidas das primeiras cabeças sensoras. Esse esquema (Figura 4.7(b)) mostra uma clara desvantagem quando comparado ao esquema da Figura 4.5 (b). Isto porque, no esquema da Figura 4.5 (b), a amplificação ocorre no local onde o sinal tem baixa potência, isto após a luz já ter se propagado por várias cabeças sensoras, enquanto que no esquema da Figura 4.7 (b), a amplificação ocorre próxima ao OTDR, onde o sinal tem alta potência. A potência do sinal refletido em excesso, a partir das primeiras cabeças sensoras, causa saturação no OTDR. Sendo o atenuador de 10 dB correspondente a 50 km de fibra monomodo padrão (0,2dB/km), tem-se com isto um esquema amplificado que seria útil para distâncias muito longas entre o OTDR e as cabeças sensoras, acima de 75 km.

Na Figura 4.8 são apresentados os traços do OTDR obtidos dos aparatos experimentais da Figura 4.7, onde os números nos picos correspondem às cabeças sensoras enumeradas de 1 até 6. Além disso, a Figura 4.8 (b) mostra resultados para dois diferentes valores de ganho no EDFA, 17 dB (linha tracejada) e 20 dB (linha sólida), obtidos pela mudança da



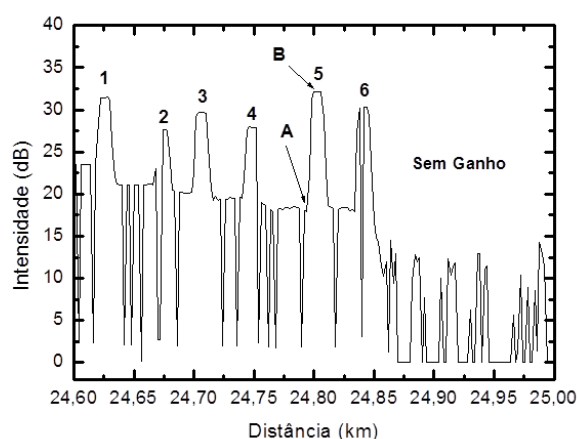
**Figura 4.7:** Sistema sensor multiponto de corrosão (a) sem e (b) com amplificação.

potência do laser de bombeio na EDF, de 17,6 mW e 25 mW, de acordo com a Figura 4.4 (a). Para essas medições usou-se a largura do pulso de 50 ns gerado pelo OTDR.

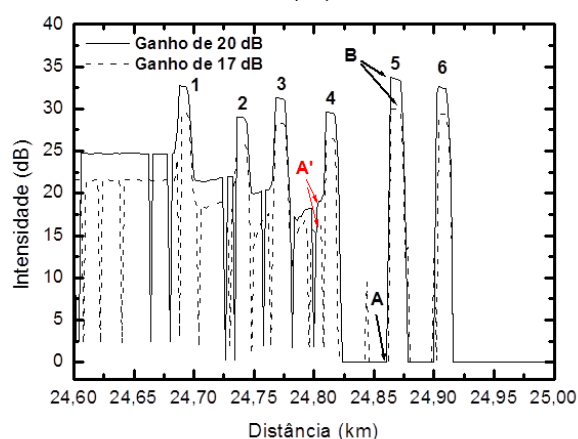
Foi escolhido arbitrariamente a cabeça sensora de número 5 (Figura 4.7) para realizar as medições da corrosão. A medida da taxa de corrosão é feita mergulhando a cabeça sensora 5, que contém o filme de Al, no Al-etcher em intervalos de tempo curtos (em segundos) medidos com um cronômetro. O traço do OTDR é obtido para cada intervalo de tempo de exposição ao ácido. À medida que o Al é removido da face da fibra, a intensidade da luz medida no OTDR diminui, como ilustrado na Figura 4.9.

A Figura 4.9 mostra a relação entre o pico (ponto B) e o vale (ponto A) da luz refletida mostrada na Figura 4.8 como função do tempo de corrosão do Al. Ainda na Figura 4.9, tem-se que até 30 s de corrosão não há qualquer alteração significativa na intensidade da luz refletida no OTDR, uma vez que o Al está ainda muito espesso. Depois disso, a reflexão cai para um valor mínimo e, em seguida, estabiliza a um nível constante. Este nível constante significa que o processo de corrosão do Al na face da fibra cessou. Obtém-se a taxa de corrosão tendo a espessura do metal depositado e o tempo necessário para atingir o nível constante. Na Figura 4.9 (a), mostra-se os resultados para o regime não amplificado da Figura 4.7 (a). Já nas Figuras 4.9 (b)-(c), mostra-se os resultados para o regime amplificado da Figura 4.7 (b) com 17 dB e 20 dB de ganho, respectivamente. Em todos eles, a corrosão do filme de Al levou 47 s. Aplicando a taxa de corrosão esperada de 50 nm/min [65], tem-se que a espessura do Al depositado na fibra é de 39 nm. O vale mostrado nas Figuras 4.9 (a)-(c), um pouco antes do final do processo de corrosão, é um efeito que foi previamente discutido por Martins-Filho e Fontana [6] e é objeto de estudo no Capítulo 5.

Foi também investigado o efeito de variações do ganho do EDFA que podem ocorrer



(a)

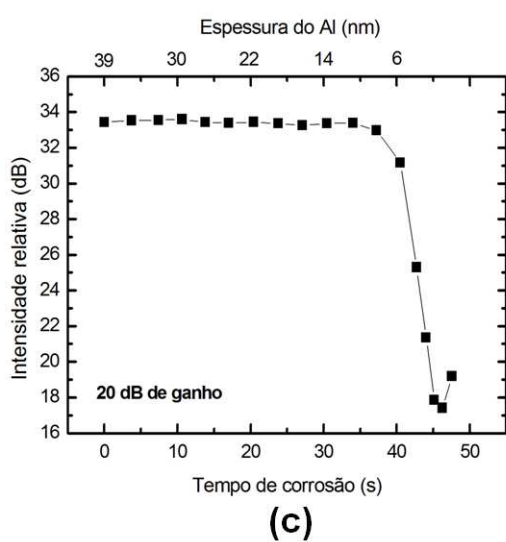
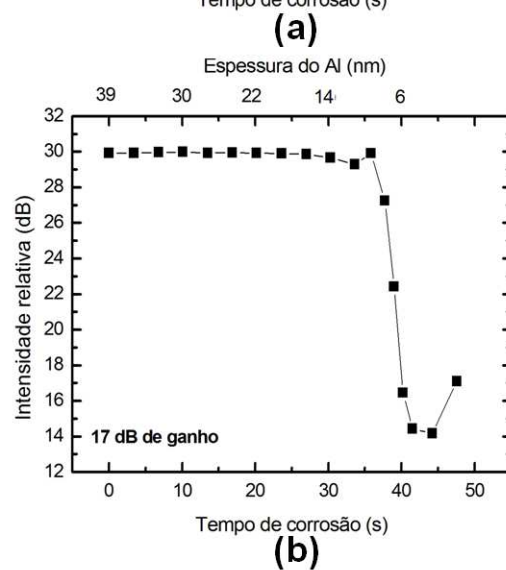
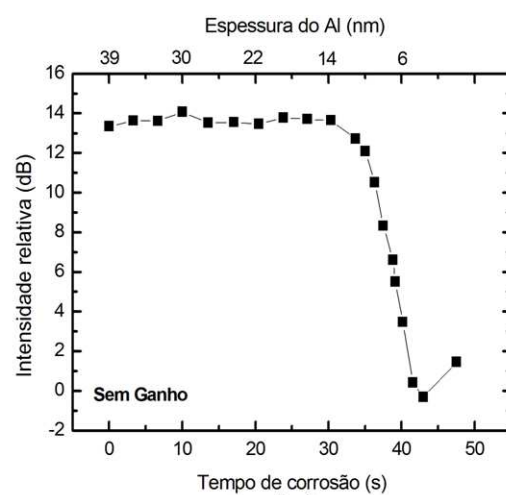


(b)

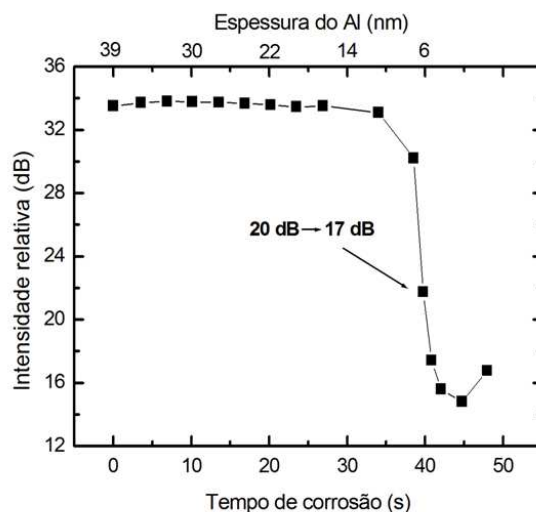
**Figura 4.8:** Traços do OTDR (a) não amplificado e (b) amplificado do sistema sensor apresentado na Figura 4.7 para diferentes ganhos (17 dB e 20 dB).

entre duas medições consecutivas do traço do OTDR. Essas variações podem ocorrer em aplicações reais devido a alterações na potência do *laser* de bombeio (envelhecimento do *laser*), ou até mesmo devido a alterações na temperatura da EDF [68]. A Figura 4.10 (a) mostra as medições da intensidade relativa do OTDR como função do tempo de corrosão com uma variação de ganho do EDFA de 20 dB para 17 dB, no ponto indicado. Na Figura 4.10 (b) o ganho muda de 17 dB para 20 dB.

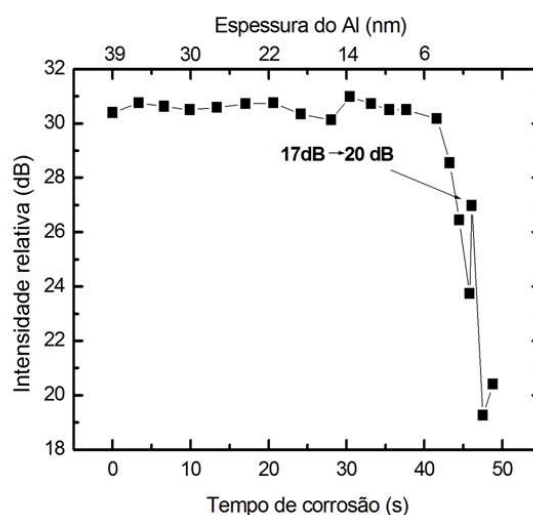
Como seria esperado, o tempo de corrosão medido não foi modificada por alterações no ganho do EDFA. No entanto, pode-se observar, especificamente na Figura 4.10 (b), que existe um pico na curva em função da mudança de ganho. Note que as curvas Figura 4.10 são obtidas como a diferença entre o ponto B e o ponto A (B-A) mostrado na Figura 4.8 (b). O ponto B é o nível de reflexão da cabeça sensora e também é sensível a alterações de



**Figura 4.9:** Intensidade relativa do OTDR como função do tempo de corrosão do filme de Al para os seguintes casos: (a) sem ganho, (b) ganho de 17 dB e (c) ganho de 20 dB.



(a)

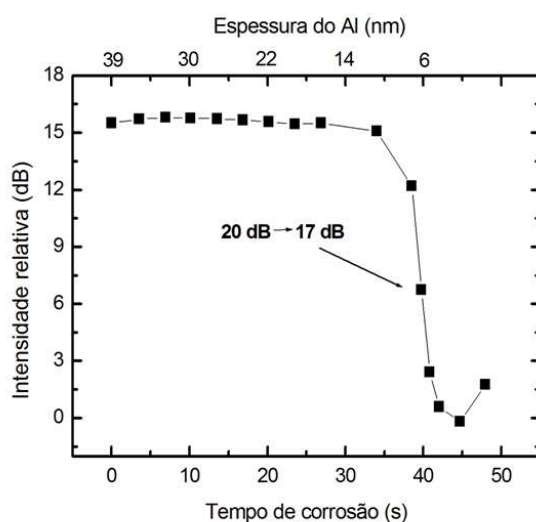


(b)

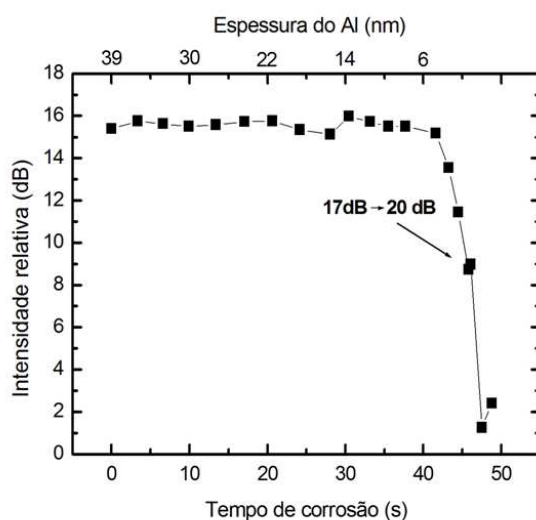
**Figura 4.10:** Intensidade relativa (B-A) para a corrosão do Al sob variações de ganho: (a) de 20 dB para 17 dB e (b) de 17 dB para 20 dB.

ganho, mas o ponto A, que é o nível de referência não é, pois é zero. Portanto, essa sensibilidade à mudança de ganho poderia ser minimizada ou mesmo eliminada se outro nível de referência fosse usado, uma referência que também seja afetada pela mudança de ganho. Por exemplo, o ponto A' mostrado na Figura 4.8 (b) é também afetado pela mudança de ganho, similarmente ao ponto B. Se as intensidades relativas do OTDR da Figura 4.10 forem recalculadas utilizando o ponto A' em vez do ponto A, obtém-se as curvas mostradas na Figura 4.11, que mostram quase nenhuma variação do ganho. Portanto, a escolha adequada do nível do referencial para obter as intensidades relativas é importante para garantir

a imunidade dos resultados obtidos perante variações de níveis de sinal, isto é, para manter o sistema auto-referenciado.



(a)



(b)

**Figura 4.11:** Intensidade relativa (B-A') para a corrosão do Al sob variações de ganho: (a) de 20 dB para 17 dB e (b) de 17 dB para 20 dB.

## 4.4 Conclusões

Foram apresentados os resultados experimentais para duas configurações de um sistema OTDR amplificado para sensores multiponto de corrosão, em que um EDFA remotamente bombeado é colocado entre as cabeças sensoras no enlace de fibra, longe do OTDR, e na outra configuração, coloca-se o EDFA próximo do OTDR, como um reforço para o sinal

do OTDR, antes das cabeças sensoras. Os resultados mostram que a utilização da configuração em que o EDFA está próximo do OTDR é mais indicado para o caso de medições a longas distâncias, ou seja, várias dezenas de quilômetros de distância entre o OTDR e a primeira cabeça sensora. Também foi mostrado que a amplificação óptica aumenta o alcance do sistema, permitindo o aumento do número de cabeças sensoras no sistema com o uso de pulsos do OTDR com largura temporal mais curta, o que implica numa melhor resolução espacial do sistema de monitoramento. Foram realizadas medições de corrosão com os sistemas de amplificação, em condições laboratoriais controladas, para diferentes valores de ganho do amplificador. Os resultados mostraram que as medidas de corrosão obtidas a partir do sistema não são sensíveis a variações de ganho de 3 dB. Além disso, se o nível de referência adequado for escolhido, as variações de ganho que podem ocorrer durante as medições do processo de corrosão podem ser canceladas, o que reforça a característica auto-referenciada deste sistema sensor de fibra óptica. Este é o primeiro trabalho sobre a caracterização experimental de sistemas OTDR amplificados para longas distâncias com aplicações em sensores de corrosão.



# CAPÍTULO 5

## INFLUÊNCIA DA RUGOSIDADE EM FIBRAS METALIZADAS SOB CORROSÃO

**N**este capítulo é feita uma análise detalhada do resultado da corrosão do filme de Al já apresentada no Capítulo 4. Na Seção 5.1, tem-se uma introdução, onde é destacado o fato de que no processo de corrosão do filme de Al se gera uma rugosidade de superfície. Isso servirá como motivação para o estudo da influência dessa rugosidade no sinal óptico medido pelo sistema sensor de corrosão. Na Seção 5.2, é apresentado o aparato experimental, como também os resultados experimentais obtidos, e a análise dos resultados experimentais. Por fim, na Seção 5.3 são feitas as conclusões sobre o capítulo.

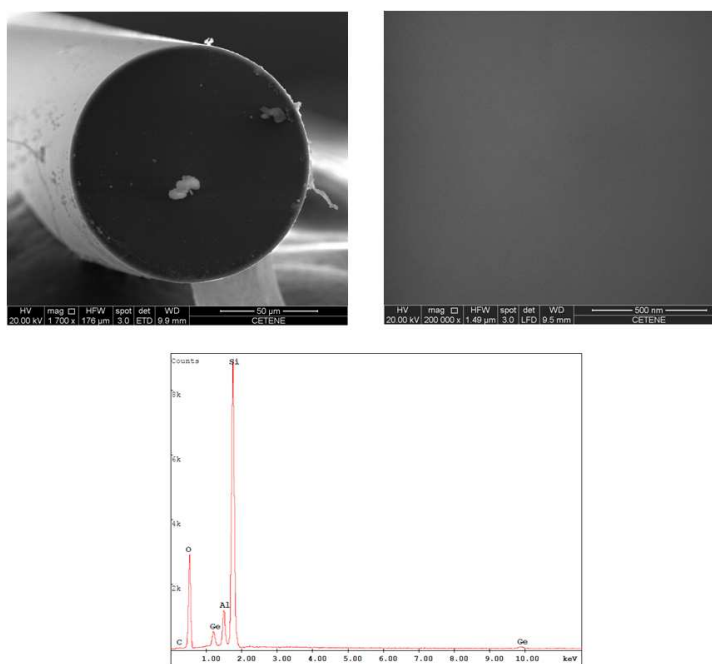
### 5.1 Introdução

Neste capítulo são descritos novos resultados experimentais obtidos com outro aparato experimental, que também reproduz as curvas obtidas pelo sistema proposto por Martins-Filho e colaboradores [4]. O objetivo desses novos estudos é verificar a influência de estruturas rugosas no filme metálico, que é corroído em sucessivas etapas de imersão da ponta sensora na solução ácida. O estudo detalhado dos efeitos da corrosão na medida óptica é de fundamental importância para o entendimento dos resultados obtidos pelo sensor óptico de corrosão de Martins-Filho e colaboradores [4], haja visto que tais efeitos podem ser relevantes para o monitoramento da corrosão em uma possível aplicação desse sistema sensor em campo.

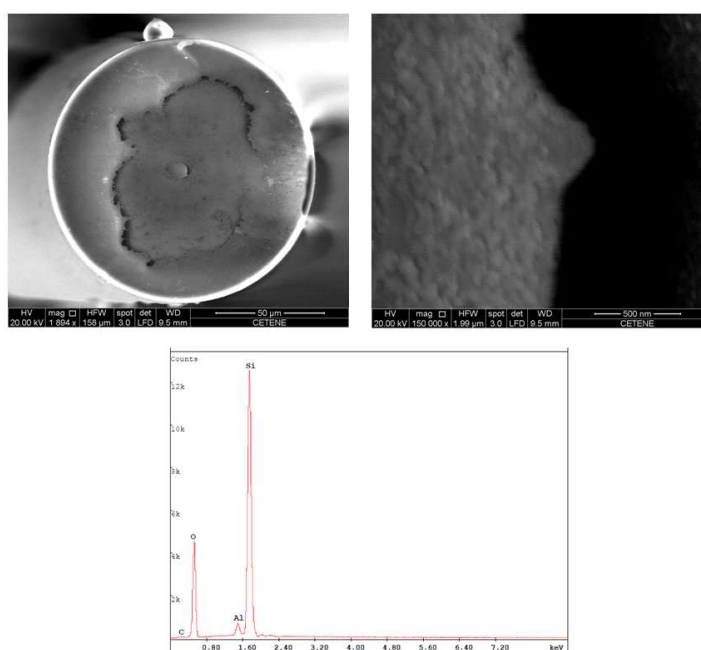
Como observado no Capítulo 4, os resultados experimentais obtidos apresentaram uma característica comum que foi o surgimento do vale no decorrer do processo de corrosão do Al. Essa evidência pode estar associada ao surgimento de rugosidade na superfície do filme de Al durante o processo de corrosão. Isso fica ainda mais claro com as imagens ilustradas na Figura 5.1 obtidas por microscopia eletrônica de varredura (SEM - *Scanning electron microscope*) na face da ponta da fibra óptica metalizada com Al. As imagens da Figura 5.1 foram feitas no Laboratório de Microscopia do Centro de Tecnologias Estratégicas do Nordeste (CETENE). Além disso, também foi feita a espectroscopia de dispersão de energia (EDS - *Energy Dispersive Spectroscopy*) para analisar a quantidade de elementos químicos que constituem as amostras.

A Figura 5.1 mostra a face da ponta da fibra óptica metalizada sem e com corrosão em duas escalas:  $50\ \mu\text{m}$ , que representa toda extensão da face da fibra óptica e  $0,5\ \mu\text{m}$ , que se localiza no centro da fibra óptica onde se encontra seu núcleo. Como observação, o núcleo da fibra óptica monomodo, que é utilizada no sistema sensor, possui um diâmetro da ordem de  $10\ \mu\text{m}$  e também suporta apenas o modo híbrido  $HE_{11}$  também conhecido como modo fundamental [37]. Note que na Figura 5.1 (a), tem-se uma superfície metálica que não foi exposta a um agente corrosivo e constata-se a ausência da rugosidade na superfície do filme de Al. No entanto, na Figura 5.1 (b), o filme de Al é exposto a um agente corrosivo e como resultado é possível observar a rugosidade na superfície do filme de Al. Os resultados da EDS mostram grande quantidade de Silício e Oxigênio como esperado (Elementos que constituem a fibra óptica) e a presença do Al que varia em sua quantidade nas amostras sem e com corrosão. Além disso, as EDSs mostram que ambas amostras sofreram contaminação de Carbono em pequena proporção quando comparado com os outros elementos e na amostra sem corrosão também apareceu o Germânio. Como observação, as EDSs foram feitas no centro das amostras numa região que corresponde ao núcleo da fibra óptica.

Neste capítulo serão descritos novos resultados experimentais obtidos com outro aparato experimental, que também reproduz as curvas obtidas pelo sistema proposto por Martins-Filho e colaboradores [4]. O objetivo desses novos estudos é verificar a influência de estruturas rugosas no filme metálico, que é corroído em sucessivas etapas de imersão da ponta sensora na solução ácida. O estudo detalhado dos efeitos da corrosão na medida óptica é de fundamental importância para o entendimento dos resultados obtidos pelo sensor óptico de corrosão de Martins-Filho e colaboradores [4], haja visto que tais efeitos podem ser relevantes para o monitoramento da corrosão em uma possível aplicação desse sistema sensor em campo.



(a)



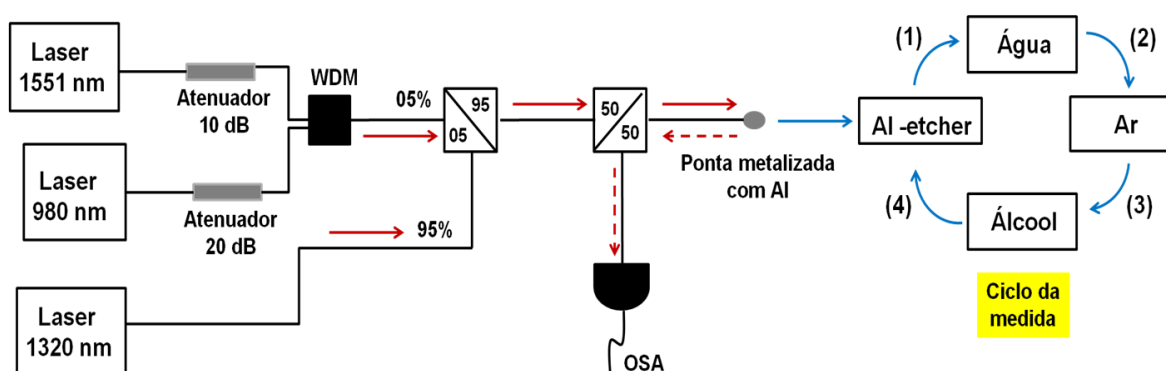
(b)

Figura 5.1: Ponta da fibra óptica metalizada com Al (a) sem e (b) com corrosão.

## 5.2 Aparato experimental e resultados

Com objetivo de estudar em detalhes o processo de corrosão do filme metálico no domínio do tempo, é proposto o esquema apresentado na Figura 5.2. Este sistema mostra a

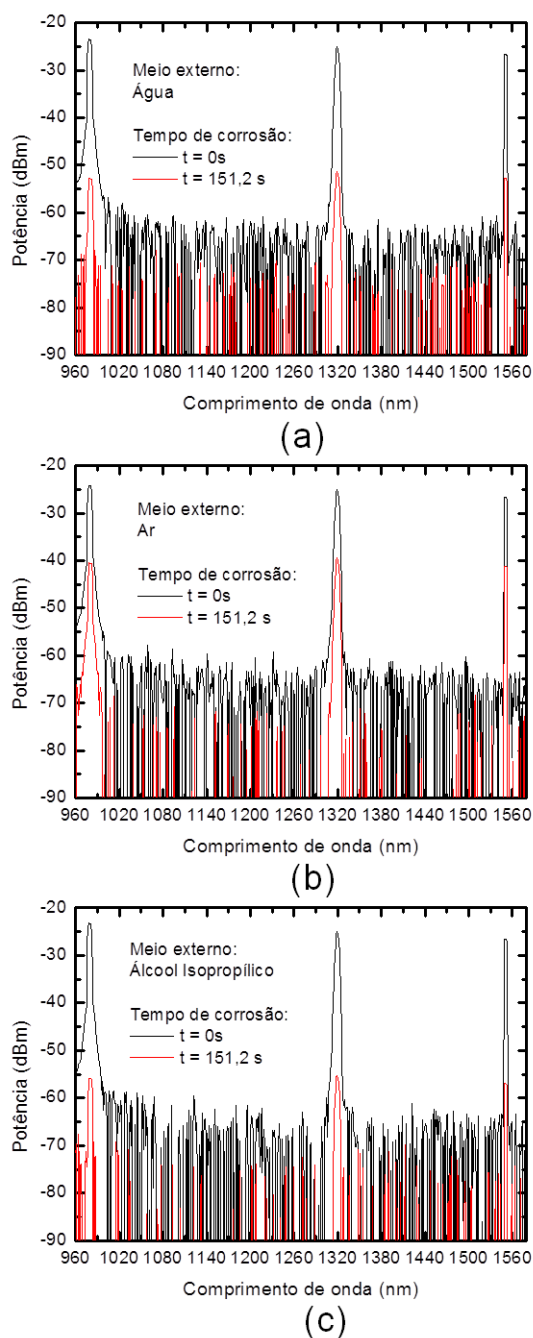
evolução do processo de corrosão do filme metálico intercalado pela imersão da ponta metalizada em diferentes meios (água, ar e álcool isopropílico) e também para diferentes comprimentos de onda ( $\lambda$ ). Com isto, será possível observar alguma influência da rugosidade de superfície, formada pela corrosão do metal, nos parâmetros ópticos, como o comprimento de onda e o índice de refração dos meios envolvidos no experimento. O aparato experimental opera com três *lasers* emitindo em 980, 1320 e 1551 nm. Os *lasers* são acionados simultaneamente e a luz gerada por eles é guiada ao longo da fibra monomodo padrão com o auxílio de acopladores direcionais (95/05 e 50/50) e do multiplexador de comprimento de onda (WDM). Utilizam-se atenuadores de 10 e 20 dB para equalizar os níveis de potência dos *lasers*. A luz proveniente das fontes se propaga através do acoplador 50/50 e é refletida na face da fibra óptica que é metalizada com um filme de Alumínio (Al) de espessura nominal de 126 nm. A luz refletida é derivada para o analisador de espectro óptico (OSA - *Optical Spectrum Analyser*) onde é feita a aquisição dos dados.



**Figura 5.2:** Aparato experimental para o estudo da corrosão em diferentes meios (água, ar e álcool isopropílico) e também para diferentes comprimentos de onda (980, 1320 e 1551 nm).

O processo de corrosão mostrado na Figura 5.2 ocorre pelo contato da ponta metalizada com o *Al-etcher* descrito na Seção 4.3. Cronometra-se cada imersão da ponta metalizada na solução ácida e, logo em seguida, essa ponta entra em contato com diferentes meios (água, ar e álcool isopropílico), na sequência (ciclo da medida) apresentada na Figura 5.2. O ciclo da medida foi definido de forma arbitrária, porém a ordem de imersão nos meios não influencia o resultado. O tempo acumulado de corrosão é medido a partir do instante da primeira imersão no ácido. O resultado do processo de corrosão é observado através da mudança da potência do sinal óptico no OSA do início até o término da corrosão do filme de Al para diferentes meios e comprimentos de onda, como ilustrado na Figura 5.3.

Através dos gráficos apresentados na Figura 5.3, pode-se determinar a evolução da corrosão da ponta metalizada em termos da potência óptica refletida pela ponta, medida em



**Figura 5.3:** Processo de corrosão do filme de Al para cada comprimento de onda dos lasers em diferentes meios: (a) água (b) ar e (c) álcool isopropílico.

cada meio externo, em função do tempo de imersão da ponta no ácido, para cada comprimento de onda, como ilustrado na Figura 5.4 e também em função da espessura do filme de Al, como ilustrado na Figura 5.5. O tempo de corrosão estimado para 126 nm de espessura de Al é 151,2 s (Figura 5.3). Na Figura 5.4, pode-se observar que até aproximadamente 135s o sistema não é sensível à corrosão do filme de Al, pois o filme é espesso demais para

haver alteração na reflexão óptica. No entanto, após esse tempo, pode-se verificar a queda da potência óptica refletida à medida que prossegue o processo de corrosão. Os resultados experimentais indicam que o ponto de início dessa queda é independente do comprimento de onda da luz, como também do meio externo. A potência óptica refletida atinge um valor mínimo e logo em seguida aumenta, até atingir um patamar constante. Note que os valores mínimo e de patamar da reflectância dependem do índice de refração do meio externo e do comprimento de onda da luz.

Para interpretar os resultados experimentais foi utilizado um modelo de Fresnell como ilustrado na Figura 5.6 [6]. Esse modelo de Fresnell é composto por três meios: fibra, Al e meio externo (ar, água, álcool isopropílico). A descrição do modelo de Fresnell é dita pela luz que se propaga no núcleo da fibra e que incide perpendicularmente à interface fibra-Al, onde parte da luz é transmitida no filme de Al com espessura  $d$  e a outra parte da luz incidente é refletida. Considerando o efeito pelicular no Al [77], pode-se ter luz sendo transmitida na interface Al-meio externo.

A medida é obtida através da luz refletida que é descrita pela formulação de Fresnell [6]:

$$\Gamma = \left| \frac{r_{12} + r_{23} \exp(-j2k_2d)}{1 + r_{12}r_{23} \exp(-j2k_2d)} \right|^2 \quad (5.1)$$

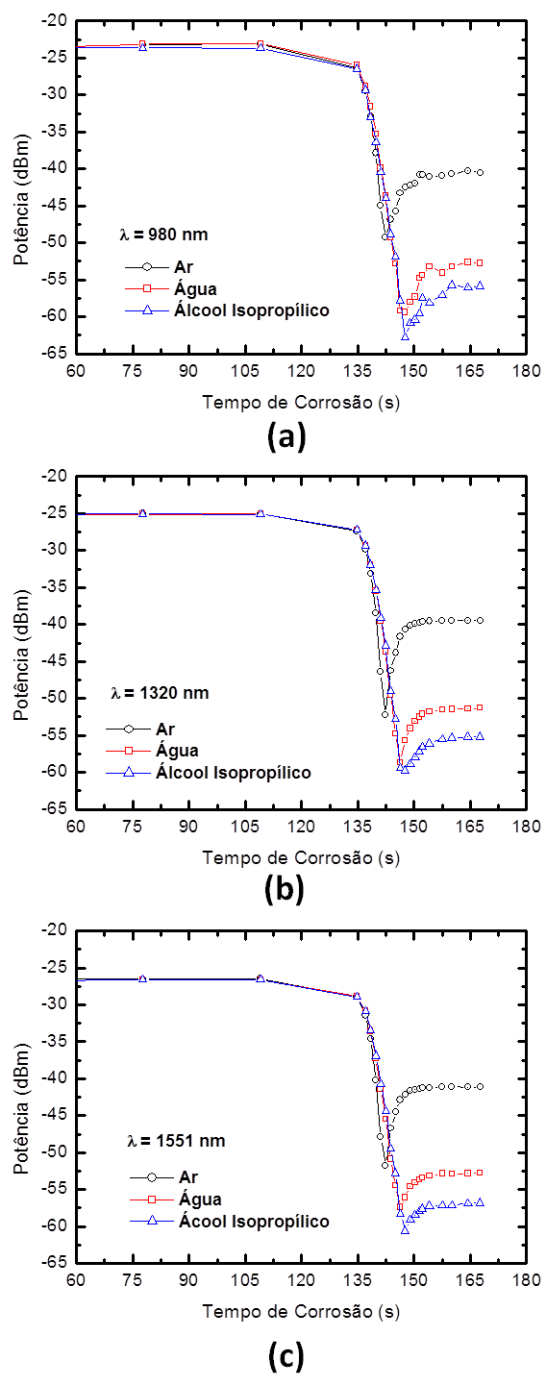
e

$$r_{i,i+1} = \frac{\sqrt{\varepsilon_{i+1}} - \sqrt{\varepsilon_i}}{\sqrt{\varepsilon_{i+1}} + \sqrt{\varepsilon_i}} \quad (i = 1, 2), \quad (5.2)$$

com  $\Gamma$  sendo a reflectância da luz,  $r_{i,i+1}$  o coeficiente de reflexão de Fresnell,  $k_2$  o número de onda do meio 2,  $d$  a espessura do filme de Al e  $\varepsilon_i$  a permissividade elétrica relativa para os meios  $i = 1, 2, 3$  (referentes ao dielétrico, metal e meio externo) como mostrado na Figura 5.6 [6].

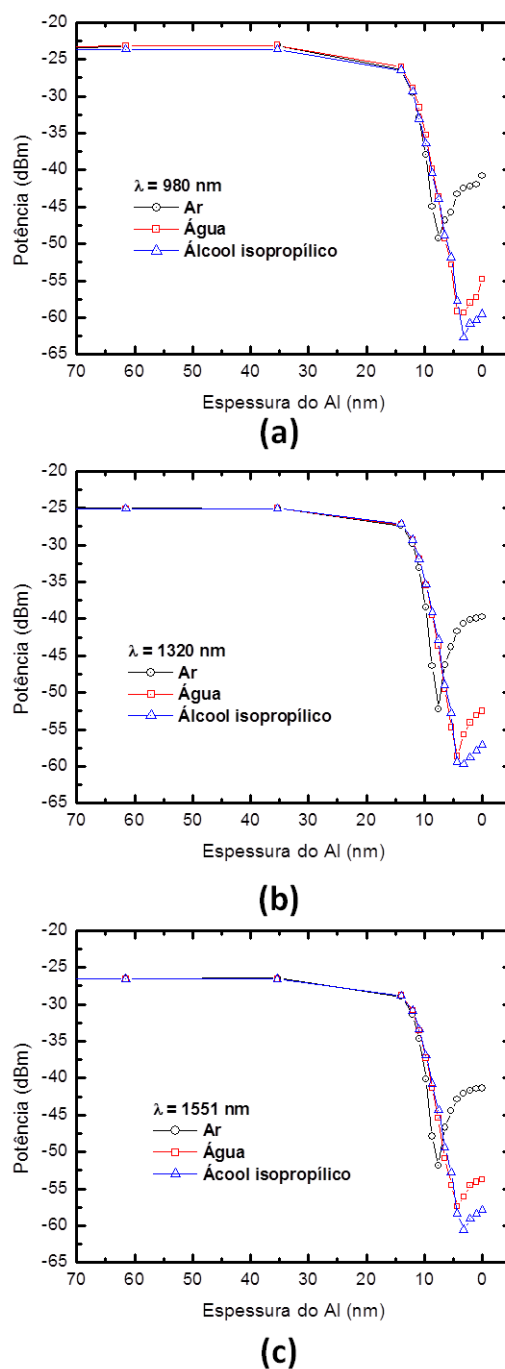
Note que a formulação dada pela equação 5.1 leva em consideração efeitos interferométricos e de atenuação óptica que podem ocorrer nos meios, mas não considera qualquer efeito que possa ser decorrente de estruturas rugosas que existam no filme metálico [6]. Ou seja, variando-se  $d$  na equação 5.1 obtém-se a variação da reflectância da estrutura em estudo em função da espessura do filme, na hipótese deste ter interfaces planas, sem qualquer efeito de rugosidade [6].

Para determinar a reflectância da luz no modelo apresentado na Figura 5.6, são usados os valores apresentados na Tabela 5.1. Essa tabela destaca os parâmetros ópticos para cada meio material (Figura 5.6) como também para os comprimentos de onda dos *lasers* usados no aparato experimental (Figura 5.2) [78–81]. Sabe-se que para a água e o Al, os



**Figura 5.4:** Potência refletida em função do tempo de corrosão em diferentes meios para cada comprimento de onda dos lasers: (a) 980 nm, (b) 1320 nm e (c) 1551 nm.

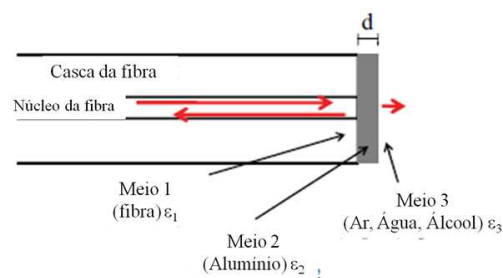
índices de refração são complexos [78, 79], ou seja,  $\sqrt{\epsilon} = n - j\kappa$ , em que se tem os termos de dispersão, puramente real  $n$ , e de absorção, puramente imaginário  $\kappa$ , da luz que se propaga no meio material [60, 77]. Já os meios ar, álcool isopropílico e sílica possuem índices de refração puramente reais [78, 80, 81].



**Figura 5.5:** Potência refletida em função da espessura do Al em diferentes meios para cada comprimento de onda dos lasers: (a) 980 nm, (b) 1320 nm e (c) 1551 nm.

O resultado dessa análise é descrito na Figura 5.7, onde se tem a apresentação dos resultados experimentais da dinâmica da corrosão em função da espessura do filme de Al para diferentes meios e comprimentos de onda, juntamente com as previsões teóricas obtidas a partir da Equação 5.1. Uma comparação entre os resultados experimentais e teóricos, para





**Figura 5.6:** Diagrama esquemático do filme de Al de espessura  $d$  depositado na face da fibra óptica [6].

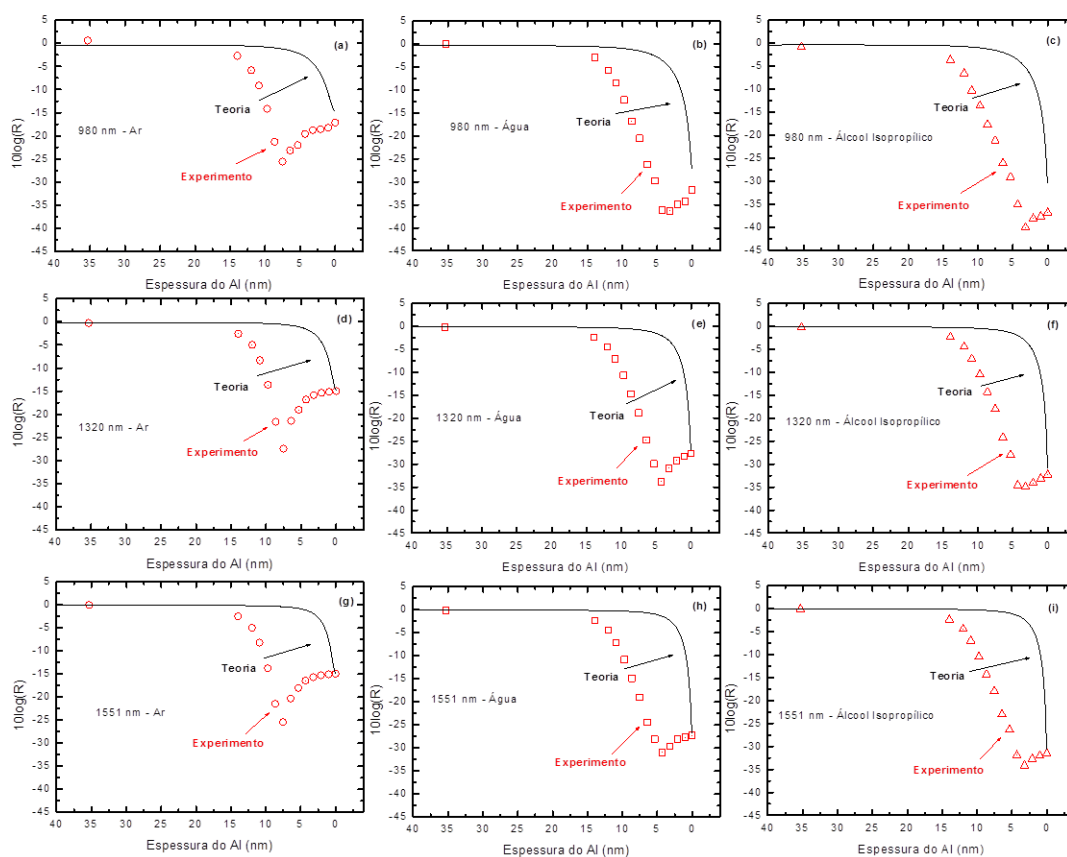
**Tabela 5.1:** Parâmetros ópticos dos materiais[59,78-81].

Meios	Parâmetros ópticos		
	Comprimento de onda ( $\lambda$ )(nm)	Índice de refração ( $n$ )	Coefficiente de extinção ( $\kappa$ )
Ar	980	1,00027423	0,0
	1320	1,0002735	0,0
	1551	1,00027326	0,0
Água	980	1,327	$3,362 \cdot 10^{-6}$
	1320	1,32235	$8,6756 \cdot 10^{-5}$
	1551	1,318	$9,8363 \cdot 10^{-5}$
Álcool isopropílico	980	1,365093	0,0
	1320	1,36604	0,0
	1551	1,362306	0,0
Alumínio	980	1,468	9,2214
	1320	1,35886	13,14
	1551	1,58006	15,669
Sílica	980	1,45067	0,0
	1320	1,44669	0,0
	1551	1,44401	0,0

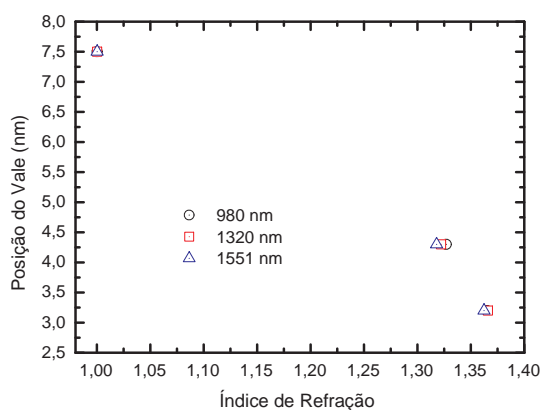
cada meio e correspondentes, mostrados na Figura 5.7, aponta como característica marcante a presença de um vale nos resultados experimentais, algo que não é previsto nas curvas teóricas. Com isso, tem-se que a rugosidade de superfície no filme de Al está afetando o sinal óptico refletido na fibra óptica.

Ainda na Figura 5.7, pode-se obter outro resultado como mostrado na Figura 5.8 que apresenta a dependência da posição do vale (ponto de mínima reflexão da luz) com o índice de refração para os diferentes comprimentos de onda utilizados nos experimentos. Observa-se nesta figura que a posição do vale diminui com o aumento do índice de refração do meio externo, mas aparentemente varia muito pouco com o comprimento de onda.

Ainda analisando o gráfico da Figura 5.8, tem-se num primeiro momento que este resultado experimental leva a crer numa possível existência do fenômeno de ressonância de



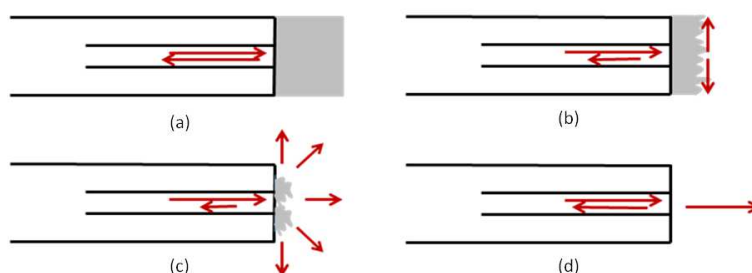
**Figura 5.7:** Traços teóricos e experimentais da reflectância em função da espessura do Al para diferentes meios e comprimentos de onda.



**Figura 5.8:** A posição do vale em função do índice de refração dos meios para cada comprimento de onda.

plásmons de superfície (SPR - *Surface Plasmon Resonance*), já que esse efeito apresenta fortes dependências com o índice de refração do meio externo, espessura do filme metá-

lico e também com o comprimento de onda da luz incidente na interface sílica-Al [82, 83]. Contudo, não foram observadas variações da posição do vale em função do comprimento de onda utilizado no experimento (Figura 5.2). Uma análise a respeito do que pode estar acontecendo com o sinal óptico refletido durante o processo de corrosão do filme de Al está ilustrada na Figura 5.9 [84].



**Figura 5.9:** Ilustração dos efeitos ópticos na ponta metalizada ao longo do processo de corrosão.

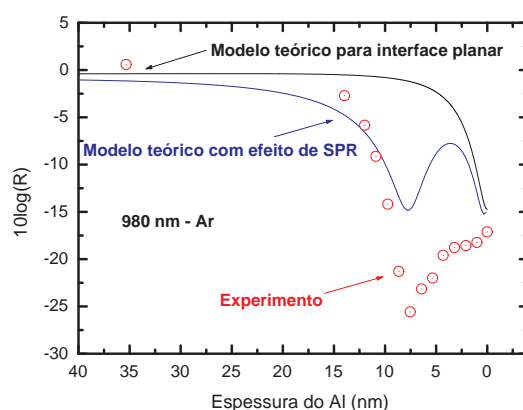
Na Figura 5.9(a), o filme de alumínio é muito espesso, de forma que a luz incidente é totalmente refletida e a reflectância é máxima. À medida que a corrosão vai acontecendo, a espessura do filme vai diminuindo e uma estrutura rugosa é formada na superfície do filme, como ilustra a Figura 5.9(b). Com a continuação do processo, grãos metálicos podem ser formados, conforme ilustrado na Figura 5.9(c). Finalmente, na Figura 5.9(d), a corrosão do filme de alumínio é finalizada, não restando resíduo de Al na ponta da fibra. Dessa forma, dependendo da espessura e da continuidade do filme, podem surgir diversos mecanismos de perdas do sinal óptico refletido. Essas perdas são advindas tanto de efeitos decorrentes da superfície rugosa do filme contínuo da Figura 5.9(b) quanto daqueles produzidos pelos grãos metálicos do filme já descontínuo da Figura 5.9(c).

Um dos mecanismos de perda é decorrente do espalhamento Rayleigh [60] que se torna mais intenso à medida que surgem grãos metálicos na superfície da fibra, conforme ilustrado na Figura 5.9(c) [84]. Esse efeito diminui com a quarta potência do comprimento de onda [37]. Um segundo mecanismo de perdas, também representado na Figura 5.9(c), poderia ser tratado com a teoria de Mie que é aplicável para o caso de objetos esféricos de dimensões pequenas da ordem do comprimento de onda da luz [85]. Essa teoria prevê a existência de ressonância de plásmons de superfície localizados [85]. No entanto, para que este mecanismo de perda seja apreciado é necessário que a frequência da luz incidente seja igual à frequência de plasma do metal [85], que para o Al está localizada no ultravioleta [86]. Portanto a teoria de Mie seria desprezível no infravermelho próximo.

O último mecanismo de perda que pode ser tratado é o efeito de ressonância de plás-

mons de superfície em filmes finos (não-localizados) [84]. Este efeito pode ser observado na condição mostrada na Figura 5.9(b). Este mecanismo não é previsto pelo modelo proposto por Martins-Filho e Fontana [6], já que não é considerada a existência da rugosidade de superfície. Contudo, a rugosidade de superfície pode gerar tal efeito ressonante em filmes finos metálicos [82, 87].

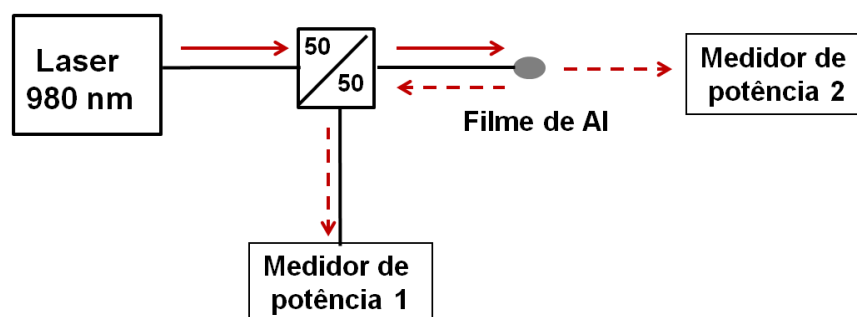
Na tentativa de considerar a rugosidade de superfície no filme de Al, simulações foram realizadas com o objetivo de ilustrar o efeito de SPR [84]. Como pode ser observado na Figura 5.10, a introdução do efeito de SPR poderia explicar a existência dos vales nos dados experimentais. No entanto, não é possível obter os níveis de reflectância observados experimentalmente, uma vez que podem existir outros efeitos ópticos que não foram considerados nesta simulação, como a dispersão de plásmons de superfície e o espalhamento de luz [82]. Assim, um tratamento teórico mais rigoroso é necessário [82].



**Figura 5.10:** Comparação entre teoria e experimento para os modelos teóricos para interface planar e interface rugosa [84].

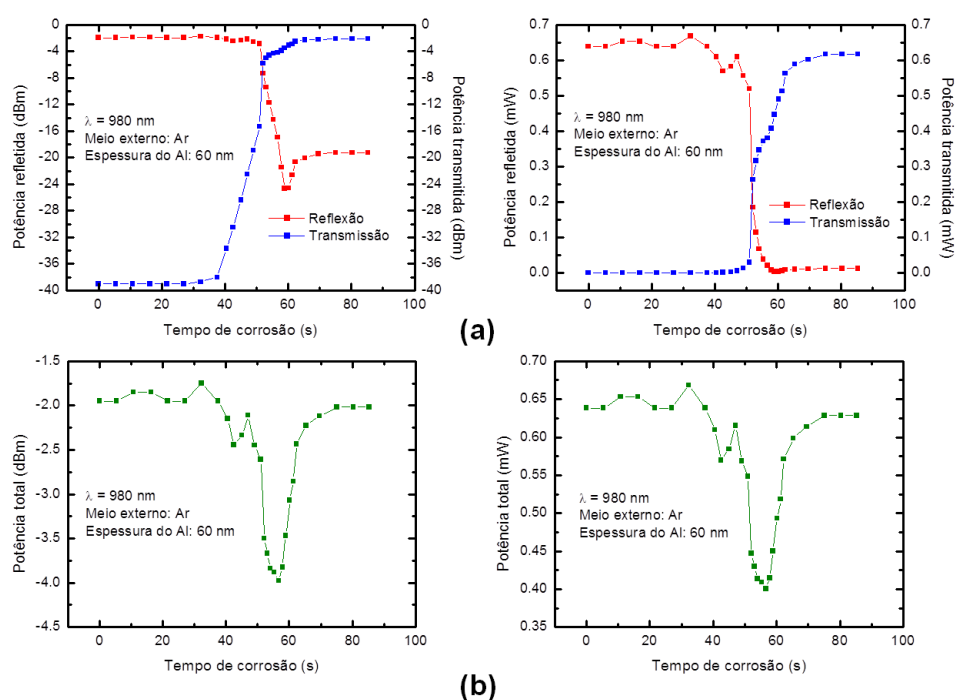
Outro aparato experimental com objetivo de analisar a possível existência do efeito de SPR é observado na Figura 5.11. Este aparato é capaz de medir as potências da luz refletida (medidor 1) e transmitida (medidor 2) na ponta metalizada exposta ao Al-etcher.

Os resultados do experimento mostrado na Figura 5.11 são apresentados nas Figuras 5.12 e 5.13. A Figura 5.12 (a) mostra as curvas de reflexão e transmissão em dB e na escala linear. Nas curvas em dB são observados vales na reflexão da luz em 59,3 s de forma clara e na transmissão da luz em 56 s de forma discreta. Quando é feita a transformação de escala, é possível observar na escala linear a presença dos vales de forma discreta. Fazendo a soma das potências refletida e transmitida em dB e linear, obtém-se a potência total como ilustrado



**Figura 5.11:** Aparato experimental para analisar o processo de corrosão do Al através da luz transmitida e refletida no filme de Al.

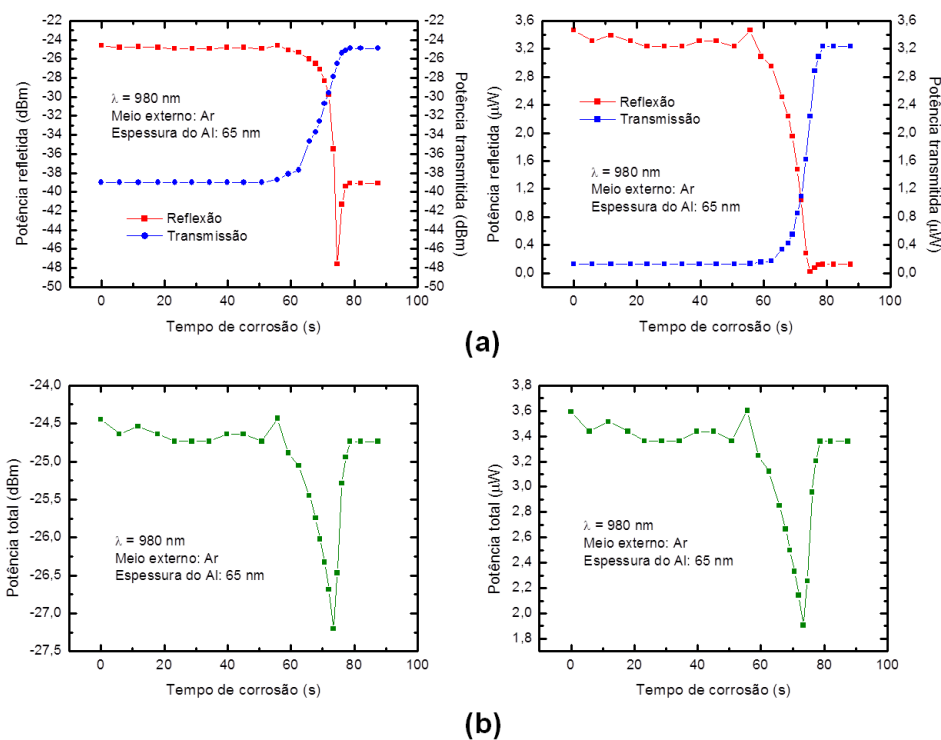
na Figura 5.12(b). Nesta figura, tem-se a perda de potência total num dado momento do processo de corrosão do metal que corresponde ao intervalo de tempo de corrosão de 31,7 s com o mínimo de potência total em 56 s. O nível de potência do *laser* usado nos resultados da Figura 5.12 é -2 dBm.



**Figura 5.12:** (a) Resultados da luz refletida e transmitida nas escalas em dB e linear e (b) da potência total nas escalas em dB e linear para o filme com 60 nm de espessura.

Diferentemente do que é observado na Figura 5.12 (a), os resultados apresentados na Figura 5.13 (a) não mostram o vale na curva de transmissão. No entanto, ele está presente na curva de reflexão em 73,4 s. Na Figura 5.13 (b), tem-se a redução da potência total num intervalo de 27,9 s com o mínimo de potência total em 73,4 s. O nível de potência do *laser*

usado nos resultados da Figura 5.13 é -24 dBm.



**Figura 5.13:** (a) Resultados da luz refletida e transmitida nas escalas em dB e linear e (b) da potência total nas escalas em dB e linear para o filme com 65 nm de espessura.

Ainda nas Figuras 5.12 e 5.13, foram feitas calibrações das perdas de potência da luz refletida até o medidor 1. Com isto, a potência refletida apresentada nessas figuras corresponde a luz refletida no filme de Al. Mesmo mostrando os vales nos gráficos da potência total, é necessário construir um modelo teórico mais efetivo para caracterizar o possível efeito de SPR.

### 5.3 Conclusões

Neste capítulo foi apresentado um conjunto de resultados experimentais para caracterização dos efeitos ópticos que influenciam o comportamento da reflectância da luz em filmes de Al expostos a processos de corrosão. Os resultados experimentais mostram uma estrutura de vale na refletividade da luz no filme cuja posição desse vale depende do índice de refração do meio externo. Foi verificado que a curva característica da reflectância da luz no filme fino não corresponde à curva teórica obtida pelo modelo de Fresnell, onde não são considerados efeitos de rugosidade de superfície no Al. Um modelo simplificado que

leva em consideração o fenômeno plásmons de superfície, devido à rugosidade causada pela corrosão do metal, explica semi-quantitativamente os resultados experimentais.

## CAPÍTULO 6

# CONCLUSÃO E PERSPECTIVAS FUTURAS

**E**sta tese apresenta melhorias no sistema de monitoramento óptico da corrosão proposto inicialmente por Martins-Filho e colaboradores. Através de um sistema sensor amplificado, foi possível melhorar o alcance do sistema sensor quando comparado com o sistema sensor sem amplificação, mesmo utilizando um filtro passa-banda para conter a saturação no OTDR, que como consequência também acaba atenuando o pulso óptico gerado pelo OTDR. O sistema sensor amplificado também mostrou outra característica importante que diz respeito à resolução espacial do OTDR. Com esse sistema é possível trabalhar com alta resolução espacial do OTDR. Isso porque o sistema amplificado é capaz de amplificar os pulsos de baixa potência gerados no OTDR. O aumento da resolução espacial possibilita uma maior quantidade de pontos de monitoramento, o que poderia tornar este sistema distribuído ao longo da fibra óptica e não mais discreto.

Além do trabalho de caracterização deste novo sistema sensor, também foram apresentados nesta tese, os resultados experimentais da corrosão de um filme de Al numa cabeça sensora escolhida arbitrariamente. Verificou-se que a corrosão para diferentes ganhos não altera o tempo de corrosão do filme de Al para uma espessura pré-estabelecida e esse resultado também está de acordo com o resultado obtido pelo sistema proposto por Martins-Filho e colaboradores. A diferença entre o sistema sensor de corrosão amplificado e não-amplificado está na intensidade relativa. Nesse caso a intensidade relativa do sistema amplificado será maior. No entanto, essa diferença entre as intensidades relativas relatadas depende do ponto de referência que é usado como base para medida da intensidade relativa. Escolhendo um



ponto de referência adequado é possível remover tal diferença de intensidade relativa no sistema sensor e com isto tornar esse sistema auto-referenciado. Além disso, foram simuladas falhas de funcionamento do sistema sensor amplificado no momento da corrosão caso o bombeio apresentasse algum problema que pudesse diminuir a potência que alimenta a EDF e também variações de ganho do EDFA devido à sua exposição a elevadas temperaturas no momento da corrosão. Como conclusão, pode-se observar que o sistema é perceptível a essas variações, porém tais variações não comprometem o processo de corrosão, quando se observa o tempo de corrosão para corroer o filme de Al.

A partir dos resultados experimentais, obtidos no processo de corrosão do filme de Al, foi feita uma análise considerando o fenômeno de SPR na caracterização da curva experimental. Além disso, os resultados experimentais da corrosão do filme de Al em diferentes meios materiais apresentaram forte dependência do sinal óptico medido pelo sensor de corrosão com parâmetros ópticos característicos dos meios externos envolvidos. Devido a isso, o sistema sensor de corrosão pode vir a ser capaz de monitorar além da corrosão outros parâmetros do meio externo.

## 6.1 Contribuições do trabalho

Esta tese contribui com os seguintes aspectos:

- ▷ Melhoramento do sensor óptico multiponto de corrosão através da amplificação do sinal óptico gerado pelo OTDR, possibilitando com isso melhor resolução espacial para o monitoramento da corrosão e também maior distância entre o ponto de medição e as cabeças sensoras. Esse sistema sensor multiponto de corrosão amplificado é o primeiro sensor óptico de corrosão à base de fibra óptica que envolve amplificação do sinal óptico.
- ▷ Estudo sobre os resultados obtidos pelo sensor de corrosão, em que são observados os aparecimentos de vales nas curvas experimentais do gráfico da intensidade relativa da luz refletida na cabeça sensora versus tempo de corrosão do filme metálico. Acredita-se que a existência desses vales pode estar associada ao fenômeno de SPR em filmes finos metálicos.

## 6.2 Propostas para trabalhos futuros

Como continuação desta tese, as seguintes propostas são sugeridas:

- ▷ Melhorar a eficiência do bombeamento remoto do EDFA com um *laser* de 1470 nm. Neste

comprimento de onda a atenuação na fibra óptica padrão é menor. Além disso, aumentar a capacidade de ganho do sistema sensor multiponto amplificado com as ampliações Raman e EDFA, respectivamente.

- ▷ Estudar os danos provocados no sistema sensor quando exposto a altas temperaturas (superiores a 200 °C) como também na cabeça sensora, haja vista que altas temperaturas podem potencializar o processo de corrosão no metal. Essa análise será feita nos meios gasosos e líquidos.
- ▷ Caracterizar, através da taxa de corrosão, o processo de corrosão de outros metais, como o ferro e o zinco, e também outros meios corrosivos à temperatura ambiente e em altas temperaturas;
- ▷ Desenvolver cabeças sensoras com dupla camada metálica. Isto tem importância no monitoramento do desgaste de películas protetoras metálicas que são aplicadas ao metal que não deve ser exposto ao agente corrosivo.
- ▷ Caracterizar os efeitos ópticos observados nas curvas experimentais apresentadas nesta tese através da óptica não-linear e levando em consideração a formação de rugosidade de superfície no filme metálico durante o processo de corrosão desse material.
- ▷ Caracterizar a morfologia da rugosidade de superfície através de análises estatísticas com o uso da microscopia de força atômica (AFM - *Atomic Force Microscopy*), afim de auxiliar no desenvolvimento do modelo teórico para melhor descrever as curvas experimentais apresentadas nesta tese.
- ▷ Desenvolver um modelo teórico capaz de descrever as curvas experimentais obtidas através do sistema sensor de corrosão. Ter conhecimento desses efeitos é de grande importância para análise dos resultados do monitoramento de corrosão em futuras aplicações de campo;
- ▷ Desenvolver um *software* interativo para o operador do sensor. Esse *software* terá como requisitos básicos acionar automaticamente, ou manualmente, o sensor para que seja feito o monitoramento da corrosão do metal, mostrar em tempo real o resultado deste monitoramento, como também salvar estes dados para fins comparativos.
- ▷ Construir um protótipo para experimentos em campo. Nessa condição será necessário configurar o tipo de proteção da fibra óptica que será usada para aplicações específicas, como monitoramento em dutos de petróleo e gás, interiores de máquinas elétricas e outros. Além disso, desenvolver um material de proteção para a cabeça sensora. Esse material deve ser capaz de resistir a ambientes com alta temperatura e a choques mecânicos provenientes do

ambiente. Esse revestimento pode ser constituído de um polímero especial que além de resistir a choques mecânicos também é resistente a altas temperaturas.

## REFERÊNCIAS

- [1] B. LEE, Review of the present status of optical fiber sensors, *Optical Fiber Technology*, v. 8, p. 57–99, 2003.
- [2] B. CULSHAW, A. KERSEY, Fiber-optic sensing: A historical perspective, *Lightwave Technology*, v. 26, p. 1064–1078, 2008.
- [3] J. M. LÓPEZ-HIGUERA, L. R. COBO, A. Q. INCERA, A. COBO, Fiber optic sensors in structural health monitoring, *Lightwave Technology*, v. 29, p. 587–608, 2011.
- [4] J. F. MARTINS-FILHO, E. FONTANA, J. GUIMARÃES, D. F. PIZZATO, I. J. COELHO, Fiber-optic-based corrosion sensor using otdr, In: **IEEE sensors conference**, 2007, p. 1172–1174.
- [5] N. THOMPSON, D. J. M. DUNMIRE, Corrosion costs and maintenance strategies - a civil/industrial and government partnership, *Materials Performance*, v. 44, p. 16–20, 2005.
- [6] J. F. MARTINS-FILHO, E. FONTANA, **Optical fibre sensor system for multipoint corrosion detection**, 1<sup>a</sup> ed. In-Tech: Vienna, 2009, cap. Optical Fibre, New Developments, p. 35–44.
- [7] R. HEIDERSBACH, **Metallurgy and Corrosion Control in Oil and Gas Production**, 1, Ed. Wiley, 2011.
- [8] K. CLARK, L. SCHILLING, Fiber optic sensor suite for corrosion and flow-assurance monitoring in deepwater flowlines, <http://jazz.nist.gov/atpcf/prjbriefs/prjbrief.cfm?ProjectNumber=00-00-4611>, Relatório Técnico, 2001.
- [9] J. YIN, M. LU, J. PIÑEDA-DE GYVEZ, Full-signature real-time corrosion detection of underground casing pipes, *IEEE Transactions on instrumentation and measurement*, v. 49, p. 120–128, 2000.

- [10] V. P. VASKIVSKY, Y. M. KEMPA, S. I. KOKA, R. V. KLYMONCHUK, O. B. LYASHCHYK, N. A. NAUMETS, Y. N. RYBAK, G. V. TSUKORNUK, Microwave pipe corrosion detector, In: **11th International Conference on Microwave and Telecommunication Technology**, 2001, p. 660–661.
- [11] L. E. ANDRADE, C. A. BRUNO, Improving the detection of flaws in steel pipes using squid planar gradiometers, *IEEE Transactions On Applied Superconductivity*, v. 11, p. 1299–1302, 2001.
- [12] G. QIAO, J. ZHOU, J. OU, Thin fe-c alloy solid film based fiber optic corrosion sensor, In: **Proc. of the 1st IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems**, 2006, p. 541–544.
- [13] S. A. WADE, C. D. WALLBRINK, G. MCADAM, S. GALEA, B. R. W. HINTON, R. JONES, A fibre optic corrosion fuse sensor using stressed metal-coated optical fibres, *Sensors And Actuators B*, v. 131, p. 602–608, 2008.
- [14] M. BENOUNIS, N. JAHHAREZIC-RENAULT, G. STREMSDOERFER, R. KHERRAT, Elaboration and standardization of an optical fibre corrosion sensor based on an electroless deposit of copper, *Sensors And Actuators B*, v. 90, p. 90–97, 2003.
- [15] M. BENOUNIS, N. JAFFREZIC-RENAULT, Elaboration of an optical fibre corrosion sensor for aircraft applications, *Sensors Actuators B*, v. 100, p. 1–8, 2004.
- [16] D. SAYING, L. YANBIAO, T. QIAN, L. YANAN, Q. ZHIGANG, S. SHIZHE, Optical and electrochemical measurements for optical fibre corrosion sensing techniques, *Corrosion Science*, v. 48, p. 1746–1756, 2006.
- [17] A. M. CARDENAS-VALENCIA, R. H. BYRNE, M. CALVES, L. LANGEBRAKE, D. P. FRIES, E. T. STEIMLE, Development of stripped-cladding optical fiber sensors for continuous monitoring ii:referencing method for spectral sensing of environmental corrosion, *Sensors And Actuators B*, v. 122, p. 410–418, 2007.
- [18] C. STAVELEY, Applications of optical fibre sensors to structural health monitoring, optimisation and life-cycle cost control for oil and gas infrastructures, <http://www.touchoilandgas.com/applications-optical-fibre-sensors-a231-1.htm>, Relatório Técnico, 2004.
- [19] V. GENTIL, **Corrosão**, 6, Ed. LTC, 2011.

- [20] R. P. ROBERGE, **Corrosion Engineering: principles and practice**, 1, Ed. McGraw-Hill, 2008.
- [21] M. G. FONTANA, **Corrosion Engineering**, 3, Ed. McGraw-Hill, 1986.
- [22] A. L. FERREIRA, F. R. COSTACURTA, M. S. ALBERTI, R. S. ZDEBSKY, **Curso de formação de operadores de refinaria: química aplicada-corrosão**, 1<sup>a</sup> ed., PETROBRAS: UniceP, 2002.
- [23] P. L. NUNES, **Fundamentos de resistência à corrosão**, 3, Ed. Interciência, 2008.
- [24] M. C. H. JAMBO, **Corrosão: fundamentos, monitoração e controle**, 3, Ed. Ciência moderna, 2008.
- [25] E. SIMOR, P. A. NOVAIS, Gerenciamento de taxa de corrosão por cupons por perda de massa, 6<sup>o</sup> COTEQ - Conferência sobre tecnologia de equipamentos e 22<sup>o</sup> CONBRAS-CORR - Congresso brasileiro de corrosão, Salvador - BA, 2002.
- [26] W. LIU, G. R. HUNSPERGER, J. M. CHAJES, J. K. FOLLIARD, E. KUNZ, Corrosion detection of steel cables using time domain reflectometry, *Materials in Civil Engineering*, v. 14, p. 217–223, 2002.
- [27] J. TIAN, M. GAO, H. ZHOU, K. LI, Corrosion detection system for oil pipelines based on multi-sensor data fusion by wavelet neural network, In: **Control and Automation – IEEE International Conference**, 2007, p. 2958–2963.
- [28] J. HAUS, **Optical Sensors: Basics and Applications**, 3, Ed. Wiley-Vch, 2010.
- [29] K. SETA, T. OHISHI, Distance meter utilizing the intermode beat of a he-ne laser, *Applied Optics*, v. 29, p. 354–358, 1990.
- [30] Y. KITAGAWA, A. HAYASHI, Fiber-optic sensor for distance and velocity measurements using speckle dynamics, *Applied Optics*, v. 24, p. 955–959, 1985.
- [31] M. G. XU, L. DONG, L. REEKIE, J. A. TUCKNOTT, J. L. CRUZ, Temperature-independent strain sensor using a chirped bragg grating in a tapered optical fibre, *Electronics Letters*, v. 31, p. 823–825, 1995.
- [32] J. P. DAKIN, D. J. PRATT, G. W. BIBBY, J. N. ROSS, Distributed optical fibre raman temperature sensor using a semiconductor light source and detector, *Electronics Letters*, v. 21, p. 569–570, 1985.

- [33] M. G. XU, L. REEKIE, Y. T. CHOW, J. P. DAKIN, Optical in-fibre grating high pressure sensor, *Electronics Letters*, v. 29, p. 398–399, 1993.
- [34] K. FRANZE, J. GROSCHE, S. N. SKATCHKOV, S. SCHINKINGER, C. FOJA, D. SCHILD, O. UCKERMANN, K. TRAVIS, A. REICHENBACH, J. GUCK, Muller cells are living optical fibers in the vertebrate retina, *Proc. Natl. Acad. Sci. U S A*, v. 104, n. 20, p. 8287–8292, 2007.
- [35] E. UDD, **Fiber Optic Sensors: An Introduction for Engineers and Scientists**, 2, Ed. Wiley, 2011.
- [36] K. T. V. GRATTAN, D. T. SUN, Fiber optical sensor technology: an overview, *Sensors and Actuators*, v. 82, p. 40–61, 2000.
- [37] G. P. AGRAWAL, **NonLinear Fiber Optics**, 3, Ed. Academic Press, 2001.
- [38] S. M. REZENDE, **Materiais e Dispositivos Eletrônicos**, 2, Ed. Editora Livraria de Física, 2004.
- [39] S. YIN, P. B. RUFFIN, F. T. S. YU, **Fiber optic sensors**, 2, Ed. CRC press, 2008.
- [40] A. J. ROGERS, Polarization optical time domain reflectometry, *Electronics Letters*, v. 16, p. 489–490, 1980.
- [41] ROGERS, A. J., POTDR: A technique for the measurement of field distributions, *Applied Optics*, v. 20, p. 1060–1074, 1981.
- [42] J. N. ROSS, Birefringence measurement in optical fibres by polarization-optical time domain reflectometry, *Applied Optics*, v. 21, p. 3489–3495, 1982.
- [43] M. K. BARNOSKI, S. M. JENSEN, Fibre waveguides: a novel technique for investigating attenuation characteristics, *Applied Optics*, v. 15, p. 2112–2115, 1976.
- [44] A. D. KERSEY, A. DANDRIDGE, Distributed and multiplexed fibre-optic sensor systems, *Electronic and Radio Engineers*, v. 58, p. S99–S111, 1988.
- [45] E. THEOCHAROUS, Differential absorption distributed thermometer, In: **1st International Conference on Optical Fibre Sensors – OFS**, v. 221, 1983, p. 10–12.
- [46] A. R. NELSON, D. H. MCMAHON, R. L. GRAVEL, Passive multiplexing system for fibre-optic sensors, *Applied Optics*, v. 19, p. 2917–2920, 1980.

- [47] G. WINZER, Wavelength multiplexing components – a review of single-mode devices and their applications, *IEEE Lightwave Technology*, v. LT-2, p. 369–447, 1984.
- [48] H. ISHIO, J. MINOWA, K. NOSU, Review and status of wavelength-division multiplexing technology and its application, *IEEE Lightwave Technology*, v. LT-2, p. 448–511, 1984.
- [49] M. B. C. SILVA, Caracterização espectral de ganho em fibras dopadas utilizando método de reflectometria óptica no domínio da frequência, Tese, PUC-Rio, 2004.
- [50] D. DERICKSON, **Fiber optic test and measurement**, 1, Ed. Prentice-Hall, 1998.
- [51] J. P. VON DER WEID, R. PASSY, B. HUTTNER, O. GUINARD, N. GISIN, Coherent reflectometry of optical fibers amplifiers, *IEEE Photonics Technology Letters*, v. 10, p. 949–951, 1998.
- [52] M. ZOBOLI, P. BASSI, High spatial resolution otdr attenuation measurement by a correlation technique, *Applied Optics*, v. 22, p. 3680–3681, 1993.
- [53] A. W. SNEIDER, J. D. LOW, **Optical Waveguide Theory**, 1, Ed. Chapman and Hall, 1987.
- [54] J. A. J. RIBEIRO, **Comunicações Ópticas**, 4, Ed. Érica, 2011.
- [55] J. L. RESTA, C. SUÁREZ, R. A. ARES, De la fibra óptica al sistema. parte 5: Cables de fibras ópticas, *Revista Telegráfica Electrónica*, v. 8, p. 779–785, 1983.
- [56] S. D. PERSONICK, Photo-probe, an optical time domain reflectometer, *Bell System Technical*, v. 56, p. 355–366, 1977.
- [57] S. RAMO, J. R. WHINNERY, T. VAN DUZER, **Fields and waves in communications electronics**, 3, Ed. John Wiley, 1994.
- [58] M. NAKAZAWA, Rayleigh backscattering theory for single-mode optical fibers, *Optical Society of America*, v. 73, p. 1179–1983, 1983.
- [59] D. R. BRAMBLEY, D. T. SMITH, Optical fibre diameter variations and their effect and backscatter loss measurements, *Electronics Letters*, v. 17, p. 308–310, 1981.
- [60] D. J. JACKSON, **Classical Electrodynamics**, 3, Ed. John Willey Sons, 2001.
- [61] K. D. BENNETT, L. R. MCLAUGHLIN, Monitoring of corrosion in steel structures using optical fiber sensors, In: **Proc. SPIE**, v. 2446, 1995, p. 48–59.



- [62] P. L. FUHR, D. R. HUSTON, Corrosion detection in reinforced concrete roadways and bridges via embedded fiber optic sensors, *Smart Materials and Structures*, v. 7, p. 217–228, 1998.
- [63] M. F. DA SILVA JR., A. R. D'ALMEIDA, F. P. RIBEIRO, L. C. G. VALENTE, A. M. B. BRAGA, A. L. C. TRIQUES, Optical fiber pH sensor, US Patent, <http://www.freepatentsonline.com/7251384.html>, Relatório Técnico 7251384, 2007.
- [64] C. K. Y. LEUNG, K. T. WAN, L. CHEN, A novel optical fiber sensor for steel corrosion in concrete structures, *Sensors*, v. 8, p. 1960–1976, 2008.
- [65] K. R. WILLIAMS, K. GUPTA, M. WASILIK, Etch rates for micromachining processing—part ii, *IEEE Microelectromechanical Systems*, v. 12, p. 761–778, 2003.
- [66] M. KÖHLER, **Etching in Microsystem Technology**, 1, Ed. Wiley-vch, 1999.
- [67] P. WALTER, W. H. TARN, **Handbook of Metal Etchants**, 1, Ed. CRC Press, 1991.
- [68] P. C. BECKER, N. A. OLSSON, J. R. SIMPSON, **Erbium-Doped Fiber Amplifiers: Fundamentals and Technology**, 1, Ed. Academic Press: New York, 1999.
- [69] G. J. COWLE, J. P. DAKIN, P. MORKEL, T. P. NEWSON, C. N. PANNELL, D. N. PAYNE, J. E. TOWNSEND, Optical fiber sources, amplifiers, and special fibers for application in multiplexed and distributed sensor systems, In: **Proc. SPIE**, v. 1586, 1991, p. 130–145.
- [70] J. M. LÓPEZ-HIGUERA, **Optical Sensors**, 1, Ed. Universidad de Cantabria Press: Santander, 1998.
- [71] M. BRAVO, M. F. VALLEJO, M. LOPEZ-AMO, Hybrid otdr-fiber laser system for remote sensor multiplexing, *IEEE Sensors*, v. 12, p. 174–178, 2012.
- [72] L. C. BLANK, D. M. SPIRIT, Otdr performance enhancement through erbium fibre amplification, *Electronic Letter*, v. 25, p. 1693–1694, 1989.
- [73] J. P. DARKIN, Distributed optical fiber sensors, In: **Proc. SPIE**, v. 44, 1992, p. 651–689.
- [74] B. WOODWARD, B. E. MUSSON, **Fiber optics: installer and technician guide**, 1, Ed. SYBEX, 2005.

- [75] M. NAZARATHY, S. A. NEWTON, R. P. GIFFARD, D. S. MOBERLY, F. SISCHKA, W. R. TRUTNA, S. FOSTER, Real-time long range complementary correlation optical time domain reflectometer, *Lightwave Technology*, v. 7, p. 23–38, 1989.
- [76] K. BINNEMANS, R. VAN DEUN, C. GÖRLLER-WALRAND, J. L. ADAM, Spectroscopic properties of trivalent lanthanide ions in fluorophosphates glasses, *Non-Crystalline Solids*, v. 238, p. 11–29, 1998.
- [77] M. N. O. SHADIKU, **Elementos do Eletromagnetismo**, 3, Ed. Bookman, 2003.
- [78] R. D. LIDE, **Handbook of Chemistry and Physics**, 85, Ed. CRC press, 2005.
- [79] P. SCHIEBENER, J. STRAUB, L. H. M. J. SENGERS, S. J. GALLAGHER, Refractive index of water and steam as function of wavelength, temperature and density, *Physical and Chemical Reference Data*, v. 19, p. 677–717, 1990.
- [80] K. CHANG-BONG, B. C. SU, Measurement of the refractive index of liquids at 1.3 and 1.5 micron using a fibre optic fresnel ratio meter, *Measurement Science and Technology*, v. 15, p. 1683–1686, 2004.
- [81] H. I. MALITSON, Interpecimen comparison of the refractive index of fused silica, *Optical Society of America*, v. 55, p. 1205–1209, 1965.
- [82] E. FONTANA, R. H. PANTELL, Characterization of multilayer rough surfaces by use of surface-plasmon spectroscopy, *Physical Review B*, v. 37, p. 3164–3182, 1988.
- [83] K. L. ANG, Y. Y. LAU, M. R. GILGENBACH, H. L. SPINDLER, Analysis of laser absorption on a rough metal surface, *Applied Physics Letters*, v. 70, p. 696–698, 1997.
- [84] F. J. NASCIMENTO, J. M. SILVA, S. J. I. COÊLHO, E. FONTANA, F. J. MARTINS-FILHO, Efeitos de ressonância de plásmons de superfície em fibra metalizada com alumínio sob corrosão. MOMAG 2012, João Pessoa - PB, 2012.
- [85] A. M. GARCIA, Surface plasmons in metallic nanoparticles: fundamentals and applications, *Physics D*, v. 44, p. 1–20, 2011.
- [86] E. FONTANA, Thickness optimization of metal films for the development of surface-plasmon-based sensors for nonabsorbing media, *Applied Optics*, v. 45, p. 7632–7642, 2006.
- [87] H. RAETHER, **Surface Plasmons on Smooth and Rough Surfaces and on Gratings**, 2, Ed. Springer-Verlag, 1988.

# APÊNDICE **A**

## LISTA DE PUBLICAÇÕES

### **A.1 Artigo publicado em periódico**

- ▷ J. F. Nascimento, M. J. Silva, I. J. S. Coêlho, E. Cipriano, J. F. Martins-Filho. “Amplified OTDR Systems for Multipoint Corrosion Monitoring”. *Sensors*, 12, p. 3438-3448, 2012. DOI: 10.3390/s120303438.

### **A.2 Artigo em fase de preparação para periódico**

- ▷ J. F. Nascimento, M. J. Silva, E. Fontana, I. J. S. Coêlho, J. F. Martins-Filho. “SPR effect on the metalized fiber with aluminium under corrosion”. *Applied Optics*.

### **A.3 Artigo publicado em conferência internacional**

- ▷ J. F. Nascimento, J. Guimaraes, E. Cipriano, M. J. Silva, J. F. Martins-Filho. “Characterization of an amplified OTDR fiber-optic multipoint sensor system”. In: Microwave & Optoelectronics Conference (IMOC), SBMO/IEEE MTT-S International. Natal - RN. p. 627 - 631. 2011. DOI:10.1109/IMOC.2011.6169337.

### **A.4 Artigos publicados em conferências nacionais**

- ▷ J. F. Nascimento, M. J. Silva, I. J. S. Coêlho, E. Fontana, J. F. Martins-Filho. “Efeitos de Ressonância de Plásmons de Superfície em Fibra Metalizada com Alumínio sob Corrosão”. In: MOMAG 2012. João Pessoa - PB.

- ▷ J. F. Nascimento, J. Guimaraes, C. E. S. Marciel, D. L. Fontana, I. J. S. Coêlho, E. Fontana, J. F. Martins-Filho. “Influência da Rugosidade na Resposta de Sensores de Corrosão à Base de Fibra Óptica”. In: MOMAG 2010. Vilha Velha - ES.