



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

ABINADI STANISCIA RUFINO DA SILVA

**SENSORES DISTRIBUÍDOS RAMAN A FIBRA ÓPTICA PARA MONITORAMENTO DE  
TEMPERATURA E GESTÃO DE ATIVOS NO SETOR DE O&G E ENERGIA**

Recife  
2025

ABINADI STANISCIA RUFINO DA SILVA

**SENSORES DISTRIBUÍDOS RAMAN A FIBRA ÓPTICA PARA  
MONITORAMENTO DE TEMPERATURA E GESTÃO DE ATIVOS NO SETOR DE  
O&G E ENERGIA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Orientador(a): Prof. Dr. Douglas Contente Pimentel Barbosa

Coorientador: Prof. Dr. Joaquim Ferreira Martins Filho

Recife  
2025

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Silva, Abinadi Staniscia Rufino da.

Sensores distribuídos Raman a fibra óptica para monitoramento de temperatura e gestão de ativos no setor de O&G e energia / Abinadi Staniscia Rufino da Silva. - Recife, 2025.

63 p. : il., tab.

Orientador(a): Douglas Contente Pimentel Barbosa

Coorientador(a): Joaquim Ferreira Martins Filho

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia Elétrica - Bacharelado, 2025.

Inclui referências, apêndices.

1. Confiabilidade. 2. Raman. 3. Sensor. 4. Temperatura. 5. O&G. 6. Setor Elétrico. I. Barbosa, Douglas Contente Pimentel. (Orientação). II. Martins Filho, Joaquim Ferreira. (Coorientação). IV. Título.

620 CDD (22.ed.)

ABINADI STANISCIA RUFINO DA SILVA

**SENSORES DISTRIBUÍDOS RAMAN EM FIBRA ÓPTICA PARA  
MONITORAMENTO DE TEMPERATURA E GESTÃO DE ATIVOS NO SETOR DE  
O&G E ENERGIA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Aprovado em: 09/04/2025.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Douglas Contente Pimentel Barbosa  
Universidade Federal de Pernambuco

---

Prof. Dr. Lauro Rodrigo Gomes da Silva Lourenço Novo  
Universidade Federal de Pernambuco

---

Prof. M.Sc. Calebe Hermann de Oliveira Lima  
Universidade Federal de Pernambuco

Aos meus pais, José Rafael e Maria de Fátima por sempre apoiarem à busca dos meus sonhos.

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente, agradeço à Deus, por me dar luz e conhecimento para superar os desafios ao longo dessa jornada acadêmica.

Ao Professor Joaquim Ferreira, por sua orientação, apoio e dedicação em todo o processo de desenvolvimento do trabalho. Ao professor Douglas Contente, por aceitar esse desafio. A Marianne Peixoto e demais pesquisadores do Grupo de Fotônica do DES/UFPE pelo apoio nos experimentos.

Aos Professores Márcio Moura e Isis Lins, por todas as contribuições para este trabalho, oportunidades acadêmicas, e ensinamentos durante este período. A troca de conhecimentos e o incentivo constante foram essenciais para o meu crescimento acadêmico e pessoal.

Ao CEERMA UFPE e PRH 38.1, pela oportunidade de participar na pesquisa que originou este trabalho. Agradeço por todo o suporte oferecido ao longo do desenvolvimento da pesquisa e pela confiança em meu potencial. Também estendo meus agradecimentos ao Professor Paulo Estevão por sua contribuição em minha formação acadêmica na indústria de Petróleo e Gás, sempre com grande generosidade e esclarecimento.

Ao Programa de Formação de Recursos Humanos da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis – PRH-38.1-ANP-FINEP, pelo apoio financeiro suportado com recursos provenientes do investimento de empresas petrolíferas qualificadas na Cláusula de PD&I da Resolução ANP nº 50/2015.

A diversos companheiros da Petrobras (Petróleo Brasileiro S.A.) pela contribuição de conhecimento técnico e aplicações práticas, que enriqueceram ainda mais o trabalho. A colaboração de todos foi essencial para a realização desta pesquisa. A todos os meus amigos e familiares, pelo apoio incondicional e por acreditarem em meu potencial, especialmente durante os momentos mais desafiadores.

E, por fim, a todos aqueles que, de alguma forma, contribuíram para que esse momento se tornasse realidade.

O pré-sal é um passaporte para o futuro. Sua principal destinação deve ser a educação das novas gerações, a cultura, o meio ambiente, o combate à pobreza e uma aposta no conhecimento científico e tecnológico, por meio da inovação. Vamos investir seus recursos naquilo que temos de mais precioso e promissor: nossos filhos, nossos netos, nosso futuro. (LUIZ INÁCIO LULA DA SILVA, 2009)

## RESUMO

O monitoramento da temperatura de um equipamento, instalação ou processo permite a obtenção de informações sobre seu estado operacional e assim indicar possíveis não conformidades ou anomalias, que podem resultar na falha e conseqüentemente na indisponibilidade do serviço. Esses dados de monitoramento são extremamente importantes na gestão de equipamentos ou ativos que devem operar, com segurança, por dezenas de anos sem falhar. Especificamente, no setor de Óleo e Gás (O&G) existem diversos equipamentos que devem operar por mais de 20 anos em um ambiente de alta temperatura, corrosão, pressão e presença de agentes químicos. No setor elétrico especificamente na área de transmissão, encontram-se estruturas de linhas de transmissão e condutores que podem operar por até 30 anos. Essas aplicações necessitam de monitoramento contínuo para garantir sua segurança operacional e disponibilidade durante sua vida útil. O Sensor Óptico Distribuído de Temperatura baseado em espalhamento Raman (SDT-R) possui características interessantes para utilização nessas aplicações, pois possui: medição por dezenas de quilômetros, capacidade de realizar medidas distribuídas ou em vários pontos por toda a extensão da fibra óptica, medição em locais de difícil acesso, uso em ambientes hostis como atmosferas explosivas, plantas nucleares e ambientes com alta interferência eletromagnética. Desta forma, o trabalho busca explorar aplicações do SDT-R no contexto do monitoramento e gestão de ativos do setor de O&G e setor elétrico, além de desenvolver e avaliar requisitos de confiabilidade de um sensor SDT-R experimental para aplicação em poço de petróleo.

**Palavras-chave:** Confiabilidade; Raman; Sensor; Temperatura; O&G; Setor Elétrico

## **ABSTRACT**

Monitoring the temperature of an equipment, installation or process allows to obtain information about its operational status and thus indicate possible non-conformities or anomalies, which could result in failure and consequently unavailability of the service. This monitoring data is extremely important when managing equipment or assets that must operate safely for dozens of years without failing. Specifically, in the Oil and Gas (O&G) sector, there is a lot of equipment that must operate for more than 20 years in an environment of high temperature, corrosion, pressure and the presence of chemical agents. In the Electric sector, specifically in transmission, there are transmission line structures and conductors that can operate for up to 30 years. These applications require continuous monitoring to guarantee their operational safety and availability during their lifetime. The Optical Distributed Temperature Sensor based on Raman scattering (DTS-R) has interesting characteristics for use in these applications, as it has: measurement over tens of kilometers, the ability to take measurements distributed or at various points throughout the length of the optical fiber, measurement in places that are difficult to access, use in hostile environments such as explosive atmospheres, nuclear plants and environments with high electromagnetic interference. In this way, the work seeks to explore applications of DTS-R in the context of asset monitoring and management in the O&G and electric sector, as well as developing and evaluating reliability requirements for an experimental DTS-R sensor for application in an oil well.

**Keywords:** Reliability; Raman; Sensor; Temperature; O&G; Electric Sector.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Espectro de comprimento de onda de luz espalhada em fibras ópticas. ...	20
Figura 2 - Diagrama de energia de processos de emissão de fótons Stokes e anti-Stokes no Espalhamento Raman. ....	22
Figura 3 - Representação de uma fibra óptica. ....	24
Figura 4 - Dimensões convencionais de fibra óptica monomodo e multimodo. ....	25
Figura 5 - Exemplo Genérico de Completação de Poço Molhado. ....	31
Figura 6 - Perfilagem da fibra óptica em poço de petróleo e log de temperatura. ....	32
Figura 7 - Configurações no modo produção. ....	33
Figura 8 - Técnicas de proteção da fibra óptica. ....	34
Figura 9 - Fotografias da instalação da fibra junto à coluna de produção. ....	35
Figura 10 – Fotografias da passagem da fibra óptica pela ANM. ....	36
Figura 11 - Exemplo de Planilha de FMECA. ....	39
Figura 12 - Protocolos de Estresse. ....	44
Figura 13 - Esquema de montagem experimental do sensor. ....	45
Figura 14 - Montagem do Sensor Experimental. ....	47
Figura 15 - Fibra óptica com revestimento de acrilato (esquerda) e Fibra óptica com revestimento de poli-imida (direita). ....	48
Figura 16 - Degradação fibra óptica sob estresse térmico. ....	50
Figura 17 - Exemplos de degradação da fibra com revestimento de acrilato. ....	50
Figura 18 - Fibra com revestimento x Fibra sem revestimento. ....	51
Figura 19 - Microscopia em 4h. ....	52
Figura 20 - Microscopia em 8h. ....	52
Figura 21 - Microscopia em 12h. ....	53
Figura 22 - Microscopia em 16h. ....	53
Figura 23 - Microscopia em 20h. ....	54
Figura 24 - Microscopia em 24h. ....	54
Figura 25 - Microscopia em 28h. ....	54
Figura 26 - Microscopia em 32h. ....	55
Figura 27 - Microscopia em 36h. ....	55
Figura 28 - Diâmetro externo da fibra durante o teste. ....	56
Figura 29 - Fibra com revestimento de acrilato após teste. ....	57

Figura 30 - Fibra com revestimento de poli-imida após teste.....57

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Avaliação do índice de criticidade. ....	38
Tabela 2 - Confiabilidade alvo do sistema FOS em poços <i>offshore</i> . ....	39
Tabela 3 - Degradação temporal do revestimento à 150 °C. ....	56

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANM	Árvore de Natal Molhada
AS	anti-Stokes
BAP	Base Adaptadora de Produção
CAPEX	<i>Capital Expenditure</i>
DHSV	<i>Downhole Safety Valve</i>
DLPC	<i>Dual Layer Primary Coating</i>
EDFA	<i>Erbium Doped Fiber Amplifier</i>
FIMT	<i>Fiber in Metal Tube</i>
FMECA	<i>Failure Mode, Effect and Critically Analysis</i>
FOS	<i>Fiber Optic Sensing</i>
MM	<i>Multimode Fiber</i>
O&G	Óleo e Gás
OPEX	<i>Operational Expenditure</i>
PDG	<i>Permanent Dowhole Gauge</i>
RPN	<i>Risk Priority Number</i>
SDT-R	Sensor Distribuído de Temperatura baseado em Espalhamento Raman
S	Stokes
SM	<i>Single Mode Fiber</i>
TEF	<i>Tube Encased Fiber</i>
TSR	<i>Tubing Seal Receptacle</i>
UEP	Unidade Estacionária de Produção
WCT	<i>Wet Christmas Tree</i>
WDM	<i>Wavelength-Division Multiplexing</i>
OTDR	<i>Optical Time-Domain Reflectometry</i>

## LISTA DE SÍMBOLOS

$E_0$	Estado fundamental da energia
$E_n$	N-ésimo estado energético
$h$	Constante de Plank
$\nu$	Frequência da onda
$\nu_{AS}$	Frequência da onda anti-Stokes
$\nu_S$	Frequência da onda Stokes

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>15</b>
1.1	OBJETIVOS .....	17
1.1.1	Geral.....	17
1.1.2	Específicos .....	17
1.2	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	17
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>	<b>19</b>
2.1	INTRODUÇÃO AOS EFEITOS NÃO LINEARES .....	19
2.2	ESPALHAMENTO RAMAN .....	20
2.3	MECANISMO DE SENSORIAMENTO DE TEMPERATURA BASEADO EM ESPALHAMENTO DE LUZ EM FIBRAS ÓPTICAS .....	22
2.3.1	Sensores de temperatura a fibra óptica distribuídos.....	23
2.4	FIBRA ÓPTICA COMO ELEMENTO SENSOR .....	24
2.5	INTRODUÇÃO À COMPLETAÇÃO DE POÇOS DE PETRÓLEO .....	28
2.6	MÉTODOS DE ANÁLISE DE CONFIABILIDADE.....	36
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>41</b>
3.1	<i>ANÁLISE FMECA DO SDT-R.....</i>	<i>41</i>
3.2	<i>TESTES ACELERADOS DE TEMPERATURA .....</i>	<i>42</i>
<b>4</b>	<b>MONTAGEM E TESTES EXPERIMENTAIS.....</b>	<b>45</b>
4.1	MONTAGEM EXPERIMENTAL DO SENSOR SDT-R.....	45
4.2	FIBRAS UTILIZADAS DURANTE O TESTE ACELERADO .....	47
<b>5</b>	<b>ANÁLISE DOS RESULTADOS.....</b>	<b>49</b>
5.1	NÍVEL DE ESTRESSE PROGRESSIVO, 110/135/160/185/210 °C, 30H.....	49
5.2	ESTRESSE CONSTANTE, 150 °C, 36H .....	51
5.3	ESTRESSE CONSTANTE, 350 °C, 4H .....	56
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO E PROPOSTAS DE CONTINUIDADE .....</b>	<b>58</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>60</b>
	<b>APÊNDICES.....</b>	<b>62</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Sensores à base de fibra óptica têm sido objeto de estudo desde 1970, e uma infinidade de sensores ópticos foram propostos para monitorar vários tipos de grandezas como: rotação, vibração, corrente elétrica, campo magnético, temperatura, pressão (BOLOGNINI e HARTOG, 2013).

A passividade da fibra óptica permite o uso desse tipo de sensor em ambientes com atmosferas explosivas, locais remotos e de difícil acesso, plantas nucleares e locais com alta interferência eletromagnética. Essas características demonstram segurança intrínseca e vasta possibilidade de aplicações dos sensores ópticos.

Esse trabalho destaca o uso de sensores distribuídos de temperatura baseados no espalhamento Raman (SDT-R) em aplicações em poços de petróleo, avaliando confiabilidade, viabilidade, benefícios e desafios de sua utilização.

Esse tipo de sensor distribuído tem sido proposto para monitoramento de temperatura em linhas de transmissão aéreas, monitoramento de temperatura de cabos de potência de linhas de transmissão subterrâneas, monitoramento de temperatura em poços de petróleo, aplicações aeronáuticas e espaciais (UKIL, BRAENDLE e KRIPPNER, 2012).

Devido a crescente necessidade de confiabilidade operacional, o desenvolvimento e aplicação de novas tecnologias de sensoriamento são de extrema importância para garantir a integridade de sistemas produtivos. Especialmente, o setor de O&G e Energia têm diversos ativos, que durante a falha, podem provocar indisponibilidade de sistemas produtivos, podendo gerar danos ao meio ambiente e imagem das empresas. Portanto a confiabilidade é um requisito essencial para todos os sistemas complexos de alto custo monetário e de alta responsabilidade social e ambiental.

Nos últimos anos, no setor de O&G, sensores à fibra óptica são amplamente utilizados em aplicações *upstream*, especialmente em poços de petróleo *onshore* e *offshore*, para o monitoramento de temperatura, vibração, pressão e detecção acústica (JOHNY, AMOS e PRABHU, 2021). Nessas aplicações, as fibras revestidas podem estar expostas a altas temperaturas acima de 205 °C/400 °F, pressões superiores a 138 Mpa/20.000 psi, e expostos a agentes químicos agressivos como

água,  $H_2S$ ,  $CO_2$  e óleo cru (JOHNY, AMOS e PRABHU, 2021). Operar nessas condições é um desafio para sensores eletrônicos tradicionais, tornando uma grande oportunidade para o sensoriamento por fibra óptica.

O monitoramento de temperatura ao longo do poço de petróleo é utilizado para obter informações sobre a temperatura do fluido de produção e de equipamentos instalados no poço. Com esses dados é possível melhorar o escoamento do petróleo e gás, otimizar a operação, elevar a confiabilidade, resultando no aumento de segurança operacional.

A relevância desse estudo reside na crescente demanda por tecnologias avançadas de sensoriamento em ambientes desafiadores e de alta complexidade, como os encontrados no setor de O&G. A utilização de sensores ópticos distribuídos, pode ser uma solução eficiente e confiável para gestão eficaz desses ativos.

## **1.1 Objetivos**

### **1.1.1 Geral**

Analisar a confiabilidade, viabilidade, benefícios e desafios da aplicação do sensor distribuído de temperatura Raman em poços de petróleo, quando submetidos a altas temperaturas.

### **1.1.2 Específicos**

- Realizar uma configuração experimental do sensor distribuído de temperatura baseado em espalhamento Raman;
- Identificar os principais modos de falhas que o sensor estará sujeito durante operação;
- Avaliar a confiabilidade do sensor SDT-R em condições extremas de temperatura encontrados em poços de petróleo, através de testes acelerados de temperatura;
- Identificar os principais desafios técnicos e operacionais na instalação e manutenção dos sensores SDT-R;

## **1.2 Organização do Trabalho**

Além deste capítulo introdutório, este trabalho de conclusão de curso foi organizado em mais 5 capítulos. Esses capítulos abordam os seguintes assuntos: 2) fundamentação teórica, aspectos básicos do espalhamento Raman, revisão da literatura sobre sensores distribuídos, aplicações e introdução de confiabilidade, 3) métodos de análise de confiabilidade e metodologia de testes acelerados, 4) desenvolvimento do sensor de temperatura distribuído baseado em espalhamento Raman experimental, 5) análise de resultados dos testes acelerados, e por fim 5), conclusão e perspectivas para trabalhos futuros.

O capítulo 2 trata da fundamentação teórica, apresentando os conceitos básicos do espalhamento Raman, mecanismos de detecção de temperatura baseado em espalhamento de luz e princípio de funcionamento do sensor distribuído. Também são discutidos os métodos de análise da confiabilidade desses sensores e uma revisão da literatura sobre a aplicação dessa tecnologia nas indústrias de O&G e energia.

O capítulo 3 apresenta o desenvolvimento experimental do sensor de temperatura distribuído baseado em espalhamento Raman (SDT-R), descrevendo a configuração experimental e os métodos utilizados para a instalação do sensor em poços de petróleo, além de discutir os principais desafios enfrentados na aplicação do sensor em ambientes hostis.

O capítulo 4 apresenta as etapas relacionadas à análise de modos de falha e planejamento e a execução de testes acelerados de temperatura. O capítulo 5 apresenta os resultados obtidos durante os testes acelerados de temperatura, avaliando a degradação do revestimento da fibra óptica sob estresse térmico.

Por fim, o Capítulo 6 apresenta as conclusões do estudo, destacando a importância dos resultados obtidos no Capítulo 5. Este capítulo também discute as perspectivas para trabalhos futuros, sugerindo possíveis adequações para o aprimoramento do sistema proposto.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo, faz-se uma revisão teórica da técnica de sensoriamento à fibra óptica por Espalhamento Raman, apresentando uma breve introdução dos efeitos não lineares em fibras ópticas, aspectos gerais do Espalhamento Raman e mecanismos de sensoriamento de temperatura baseado em espalhamento de luz.

### 2.1 Introdução aos Efeitos Não Lineares

A óptica não linear é um fenômeno que surge devido à interação não-linear da luz com a matéria, e está diretamente relacionado com a intensidade óptica da fonte emissora. Os efeitos ópticos não lineares passam a ocorrer quando os campos ópticos são intensos o suficiente para modificar as propriedades de propagação de luz (KEISER, 2014).

Os processos ópticos não lineares começaram a ser observados experimentalmente no início da década de 60, mas somente com o surgimento de novas tecnologias na década de 1990 as não linearidades passaram a ser mais recorrentes. Destacam-se as tecnologias de: amplificação óptica, multiplexação por divisão de comprimento de onda (WDM – *wavelength-division multiplexing*).

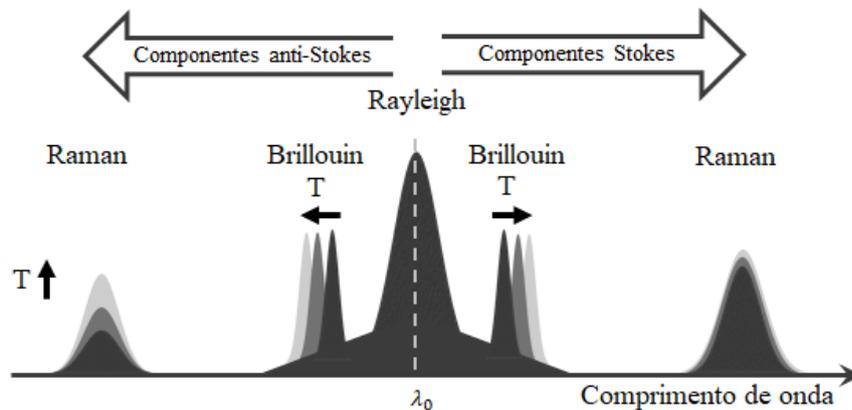
A fibra óptica geralmente é fabricada utilizando sílica, material que possui características não lineares, portanto com o aumento da potência óptica surgem os efeitos não lineares. A luz que atravessa a fibra óptica é espalhada e sofre uma mudança de frequência em comparação com a luz incidente. Ao analisar o espectro do comprimento de onda da luz espalhada, percebe-se que existem três partes espectrais: Rayleigh, Brillouin e Raman, conforme apresentado na Figura 1.

O espalhamento Rayleigh possui a mesma frequência que a luz incidente, enquanto o espalhamento Brillouin e Raman sofrem uma mudança de frequência em relação à luz incidente. Essa mudança de frequência é percebida, pelo surgimento das bandas Stokes e anti-Stokes.

As não linearidades na fibra óptica possuem aplicações bastantes úteis, inclusive o sensoriamento, pois ao ocorrer mudanças de temperatura, pressão ou deformação em algum ponto da fibra óptica, estes parâmetros físicos irão modular o sinal

espalhado. Desta forma, medindo-se esta modulação através da análise do espectro espalhado, pode-se realizar o sensoriamento desses parâmetros ao longo de toda extensão da fibra (BAO e CHEN, 2012).

Figura 1 - Espectro de comprimento de onda de luz espalhada em fibras ópticas.



Fonte: produzido por (PEIXOTO E SILVA, 2018).

A intensidade do espalhamento Raman sofre alteração com a variação da temperatura, possibilitando sua utilização para a medição de temperatura com fibra óptica. O espalhamento Raman é composto da componente anti-Stokes (fortemente dependente da temperatura) e da Stokes (pouco dependente da temperatura), ao analisar essas duas componentes pode-se obter a temperatura com grande precisão de localização.

O espalhamento Brillouin e o espalhamento Rayleigh possuem características dependentes da temperatura e da deformação, e são utilizados em sensores de temperatura e deformação/pressão.

## 2.2 Espalhamento Raman

Em 1928, os físicos C. V. Raman e K. S. Krishnan publicaram o artigo *A New Type of Secondary Radiation* (Um Novo Tipo de Radiação Secundária). Os autores demonstraram que durante o espalhamento da luz por moléculas de um meio material, a radiação espalhada, com o mesmo comprimento de onda que o feixe incidente, é acompanhada de uma radiação difusa com frequência modificada (RAMAN e

KRISHNAN, 1928). Desse modo, foram observados dois tipos de espalhamento: (i) Espalhamento Rayleigh – cuja frequência da radiação espalhada é a mesma da radiação incidente; (ii) Espalhamento Raman – cuja radiação espalhada é deslocada em frequência em relação à radiação incidente (RAMAN e KRISHNAN, 1928).

No espalhamento Raman, quando os fótons da luz incidente interagem com as moléculas de um material, ocorre a troca de energia entre eles. As moléculas (ou átomos) podem ir para um estado de energia mais excitado, e quando retornam ficam num nível de energia diferente de seu estado inicial (HEADLEY e AGRAWAL, 2005). Como produto dessas interações, são originadas duas bandas igualmente espaçadas com frequência em relação a banda principal (Rayleigh). A banda de menor frequência é denominada Stokes e a de maior frequência anti-Stokes. No caso específico da sílica, principal componente da fibra óptica, essa diferença de frequências é de 13 THz.

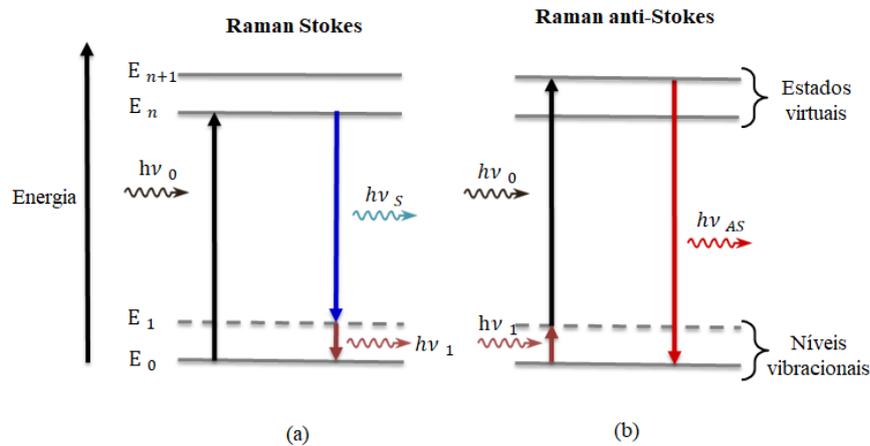
A Figura 2 ilustra o processo simplificado de absorção e emissão de energia dos estados no Espalhamento Raman Stokes e anti-Stokes. No caso do espalhamento Stokes (Figura 2a), o sistema é levado do estado fundamental de energia ( $E_0$ ) para um estado de maior energia ( $E_n$ ) devido a absorção de um fóton de energia  $h\nu_0$  de uma fonte de luz intensa, tal como um laser. Na relaxação do elétron, um fóton de frequência reduzida  $h\nu_s$  é emitido. Esse fóton é denominado de fóton Stokes. A energia remanescente é emitida pelas moléculas do material, que decaem, de um estado vibratório excitado  $E_1$  para o estado  $E_0$  (AGRAWAL, 2012). Na Figura 2a, essa transição entre níveis vibracionais corresponde à emissão de um fônon de energia  $h\nu_1$ . A energia do fóton Stokes é então,

$$h\nu_s = h\nu_0 - h\nu_1 \quad (2.1)$$

em que  $h$  é a constante de Planck e  $\nu$  é a frequência da onda (SINGH, GANGWAR e SINGH, 2007). No espalhamento anti-Stokes, o sistema absorve um fóton da fonte ( $h\nu_0$ ) e um fônon da rede/sistema ( $h\nu_1$ ), emitindo um fóton anti-stokes de maior frequência e de energia  $h\nu_{AS}$ . O processo anti-Stokes ocorre quando as moléculas do material se encontram em um nível excitado de energia vibracional, representado pela Figura 2b pela absorção de um fônon da rede. Desse modo, a energia do fóton anti-Stokes emitido deve ser:

$$h\nu_{AS} = h\nu_0 + h\nu_1 \quad (2.2)$$

Figura 2 - Diagrama de energia de processos de emissão de fótons Stokes e anti-Stokes no Espalhamento Raman.



Fonte: produzido por (PEIXOTO E SILVA, 2018).

Em equilíbrio térmico, é mais provável ocorrer o espalhamento Raman Stokes, devido a maior concentração de moléculas no estado fundamental de energia em comparação ao estado vibracional (SINGH, GANGWAR e SINGH, 2007). Nesse ponto, fica claro que ao aumentar a temperatura, e conseqüentemente o estado de energia das moléculas, resulta na maior ocorrência da componente anti-Stokes. Devido essa característica, o espalhamento Raman anti-Stokes é fortemente dependente da temperatura.

### 2.3 Mecanismo de Sensoriamento de Temperatura baseado em Espalhamento de Luz em fibras ópticas

A utilização de fibras ópticas como meio sensor, representa um avanço significativo em relação aos sensores convencionais. A natureza inerentemente óptica das medidas permite a utilização de fibras ópticas em ambientes hostis, e suas dimensões físicas e a constituição quimicamente inerte permite a sua utilização em ambientes de difícil acesso.

Ao analisar as componentes Stokes e anti-Stokes com técnicas baseadas em reflectometria óptica no domínio do tempo é possível saber a localização espacial onde originou aquele espalhamento. Nesse cenário, a medida do intervalo de tempo entre o campo incidente e o retorno da luz espalhada fornece a coordenada espacial

de ocorrência do fenômeno (DANIELSON, 1981). Essa é a principal característica dos sensores ópticos distribuídos.

### **2.3.1 Sensores de temperatura a fibra óptica distribuídos**

Os sensores de fibra óptica distribuídos são especialmente vantajosos em sistemas nos quais é necessário monitorar uma grandeza ao longo de diversos pontos ou de forma contínua (YIN e RUFFIN, 2002).

Um método muito aplicado para sensores distribuídos é o retroespalhamento de luz empregando a técnica de Reflectometria Óptica no Domínio do Tempo (OTDR), no qual a informação de interesse é obtida a partir de campos retroespalhados. Esse método oferece grande sensibilidade e a capacidade de operar a partir de uma única extremidade da fibra óptica. Contudo, uma limitação desse método é a baixa intensidade de sinal, o que resulta em um tempo de resposta mais longo, devido à necessidade de integrar múltiplos pulsos (ROGERS, HANDEREK, *et al.*, 1998).

Na técnica OTDR, pulsos ópticos de curta duração são emitidos numa extremidade da fibra, e o sinal refletido é então analisado. A caracterização, identificação e localização de anomalias do sistema óptico podem ser obtidas a partir da intensidade e do atraso temporal da luz refletida (DANIELSON, 1982). Um equipamento comumente utilizado para diagnosticar enlaces de fibras ópticas baseado nessa técnica é o reflectômetro óptico no domínio do tempo, conhecido pela sigla OTDR. Atualmente, uma grande variedade de modelos de OTDR estão comercialmente disponíveis.

A técnica OTDR é amplamente aplicada em sistemas de detecção distribuída de temperatura, tanto em curtas quanto em longas distâncias (superiores a 30 km) (BOLOGNINI e HARTOG, 2013). Nos sensores distribuídos de temperatura baseados no espalhamento Raman, essa técnica permite detectar e analisar o sinal retroespalhado Raman anti-Stokes, o qual carrega informações sobre a temperatura do sistema, possibilitando a obtenção da distribuição espacial da temperatura (KERSEY e DANDRIDGE, 1988).

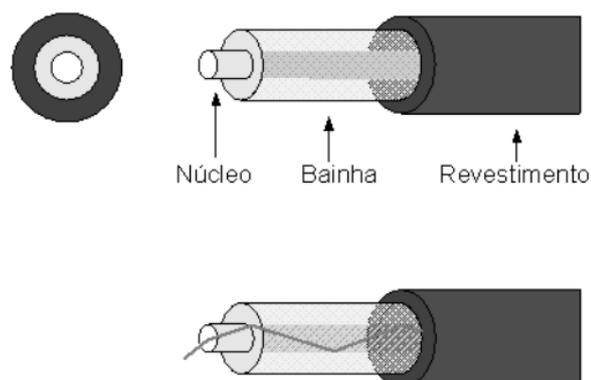
## 2.4 Fibra Óptica como Elemento Sensor

A fibra óptica é uma estrutura geométrica cilíndrica fabricada em vidro, sílica ou plástico, utilizada como meio para a transmissão de luz através de sua longa estrutura transparente e flexível. Na Figura 3 podemos ver a representação básica de uma fibra óptica convencional.

A região por onde a luz se propaga é chamada de núcleo. Esse núcleo pode ser composto por um fio de vidro especial ou por polímero, e seu diâmetro varia conforme o tipo de fibra: cerca de 9  $\mu\text{m}$  em fibras monomodo e até 62,5  $\mu\text{m}$  em fibras multimodo. O núcleo é envolvido por uma camada chamada *cladding* ou bainha, composta por um material com índice de refração menor. A diferença de índices de refração entre o núcleo e o *cladding* permite a reflexão interna total (Lei de Snell), garantindo que a luz permaneça confinada dentro do núcleo (HECHT, 2014).

Juntos, o núcleo e o *cladding* formam um conjunto fino e frágil, que é protegido por uma camada mais espessa de material protetor chamado *coating* ou revestimento. Essa camada tem como função reforçar a fibra, além de atenuar impactos e proteger contra agentes externos, como água, poeira e substâncias químicas. Dependendo da aplicação, outros revestimentos adicionais podem ser incorporados à fibra óptica para atender a requisitos específicos.

Figura 3 - Representação de uma fibra óptica.



Fonte: adaptado de (VENÂNCIO, COTTIS, *et al.*, 2009).

De acordo com o número de modos de propagação da luz, as fibras ópticas podem ser classificadas em monomodo ou multimodo. A Figura 4 ilustra as dimensões típicas dessas duas categorias.

As fibras monomodo transmitem a luz por um único modo de propagação, ou seja, a luz segue apenas um caminho dentro da fibra. Este tipo de fibra possui dimensões menores em comparação com as fibras multimodo, o que resulta em uma fabricação mais complexa. As dimensões convencionais de uma fibra monomodo são:

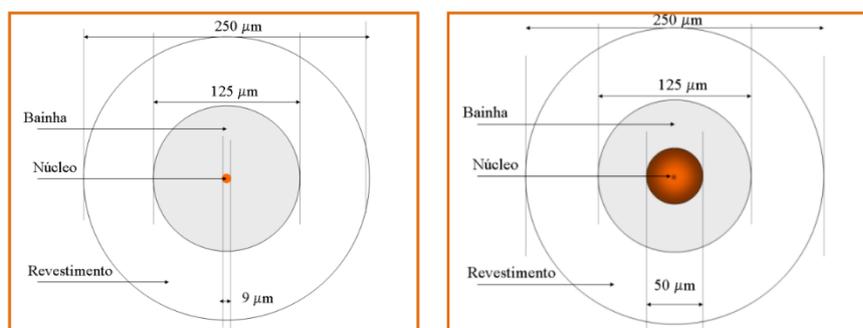
- Núcleo: 9  $\mu\text{m}$ ;
- *Cladding*: 125  $\mu\text{m}$ ;
- *Coating*: 250  $\mu\text{m}$ ;

Devido ao seu núcleo reduzido, a fibra monomodo apresenta uma atenuação de sinal mais baixa, o que permite a transmissão da luz por longas distâncias, que podem ser superiores a 50 km.

Por outro lado, a fibra multimodo tem um diâmetro de núcleo maior que permite que vários modos de luz se propaguem simultaneamente. As fibras multimodo geralmente possuem as seguintes dimensões:

- Núcleo: 50 ou 62,5  $\mu\text{m}$ ;
- *Cladding*: 125  $\mu\text{m}$ ;
- *Coating*: 250  $\mu\text{m}$ ;

Figura 4 - Dimensões convencionais de fibra óptica monomodo e multimodo.



Fonte: próprio autor.

Dependendo da aplicação, a fibra óptica precisa ser projetada para resistir às condições adversas do ambiente. O revestimento (*coating*) desempenha um papel crucial na proteção da fibra óptica contra altas temperaturas, agentes químicos, líquidos e choques mecânicos. Especialmente contra a entrada de líquidos ricos em hidrogênio, que causam o escurecimento da fibra e aumento da atenuação, tornando-a inoperável (BROWN e HARTOG, 2002).

Uma condição adversa presente em poços de petróleo é a presença de moléculas de hidrogênio, que podem difundir através do revestimento da fibra e causar o aumento da perda óptica. É um efeito irreversível chamado de *hydrogen darkening* (WANG, DRENZEK, *et al.*, 2004).

Diversos estudos foram realizados para avaliar o efeito da degradação devido à difusão de hidrogênio (WANG, DRENZEK, *et al.*, 2004), (KAURA e SIERRA, 2008), (STOLOV, SIMOFF, *et al.*, 2020). Eles indicam que esse efeito pode ser impedido ou retardado com a aplicação de algumas técnicas, como:

- Adição de revestimento adicional contra difusão de hidrogênio;
- Escolha do comprimento de onda da fonte de luz emitida (laser);
- Adição de revestimentos especiais: acrilato, carbono, poli-imida, etc;
- Proteção extra com tubos metálicos: *Fiber in Metal Tube (FIMT)* e *Tube Encased Fiber (TEF)*

A temperatura em que a fibra óptica está submetida também é um fator a ser considerado. O aumento da temperatura resulta no aumento da taxa de difusão de hidrogênio (KAURA e SIERRA, 2008).

Em ambientes com alta temperatura revestimentos especiais devem ser utilizados, como: carbono, cerâmica, silicões, poli-imida. Esses revestimentos suportam temperaturas elevadas e dão maior resistência mecânica à fibra óptica (STOLOV, SIMOFF, *et al.*, 2020).

A resistência mecânica da fibra óptica é, em grande parte, determinada pelas propriedades do seu revestimento de polímero, que desempenha um papel crucial na proteção da fibra contra choques mecânicos, tensões e pressão. No que diz respeito à estabilidade térmica, observa-se que o núcleo da fibra óptica, composto por sílica, possui uma excelente resistência a altas temperaturas, com ponto de fusão em torno

de 1700 °C. No entanto, o revestimento polimérico deve ser selecionado cuidadosamente para garantir que suporte temperaturas elevadas sem comprometer a resistência mecânica da fibra, assegurando, assim, a performance do sensor em condições de alta temperatura.

Estudos realizados demonstraram que os revestimentos poliméricos da fibra óptica começam a sofrer um processo gradual de decomposição térmica (termo-oxidação) quando expostos a fontes de energia térmica suficientemente intensas (STOLOV, SIMOFF e LI, 2008). Durante esse processo, as moléculas do revestimento são progressivamente liberadas para a atmosfera devido à decomposição térmica, resultando em uma perda de massa irreversível, que se reflete na diminuição do diâmetro do revestimento, na perda de rigidez mecânica e no surgimento de deformações. Essas alterações comprometem a integridade estrutural do revestimento e podem levar ao enfraquecimento da fibra, resultando em sua eventual quebra mecânica.

## 2.5 Introdução à Completação de Poços de Petróleo

Quando há descoberta de um reservatório de hidrocarbonetos em uma bacia sedimentar, são realizados diversos testes a fim de confirmar a viabilidade para produção de petróleo e gás. Após a confirmação da reserva, é realizado o processo de perfuração e cimentação de um poço de petróleo. Terminada a etapa de perfuração do poço, é realizada uma etapa chamada de completação, ou seja, a transformação do poço perfurado em uma unidade produtiva completamente equipada com todos os equipamentos e sistemas que garantem os requisitos de segurança e tornam o poço pronto para a produção.

A completação de poços de petróleo é o conjunto de operações que preparam o poço para produzir petróleo e gás. Isso envolve a instalação de um conjunto de equipamentos dentro do poço. Dentre os principais equipamentos para completação de poços *offshore*, destacam-se:

- **Árvore de Natal Molhada (ANM):** Equipamento instalado no leito marinho, composto de um conjunto de válvulas tipo gaveta, operadas remotamente, que controlam o fluxo dos fluidos produzidos ou injetados nos poços de petróleo e gás. Entre as funções de uma ANM, tem-se que esta cria uma barreira de segurança, permitindo retenção do fluido de produção e regulação deste, além de permitir injeção contínua de produtos químicos. Permite também o controle das válvulas de fundo e transmissão dos dados elétricos de instrumentos, assim como também permite futuras intervenções no poço.
- **Base Adaptadora de Produção (BAP):** A BAP serve de interface entre a cabeça do poço, ANM e as linhas de fluxo e controle, com o objetivo de alojar o *tubing hanger*, receber e travar a ANM e as conexões das linhas.
- **Suspensor de Coluna (*Tubing Hanger*):** Realiza a interface entre a ANM e a coluna de produção. Este, pode ser ancorado e travado na BAP ou na ANM, fazendo a sustentação da coluna de produção.
- **Tubos de Produção:** Utilizados para conduzir o fluido de produção para a ANM ou o contrário, em casos de injeção. Os tubos de produção são tubos de aço sem costura, com diâmetros variáveis, sendo mais utilizados os de 5 ½ polegadas e 6 5/8 polegadas.

- **Válvula de Segurança de Subsuperfície (DHSV):** É uma válvula de segurança da coluna de produção, geralmente posicionada à cerca de 30 metros abaixo do fundo do mar. Sua principal função é fechar a coluna, baseada no princípio *fail-safe-closed* (falha segura fechada), ou seja, quando o poço está produzindo, ela está pressurizada com fluido hidráulico, mantendo-a na posição aberta, mas com o modo *fail-safe-closed*, com retorno por mola controlando a *flapper*. No caso de perda de potência hidráulica, as válvulas são automaticamente levadas para a posição fechada, interrompendo o fluxo de produção. Seu acionamento correto vai acontecer somente em extrema urgência, quando já se perdeu controle do poço da superfície, isolando os fluidos, produzidos do reservatório. mandril de gás lift e mandril de injeção química de bolso lateral.
- **Mandril de Gás Lift:** Quando o poço não é surgente, precisa-se fazer uso do mandril de gás *lift*, que aloja válvulas necessárias para a recirculação do gás passante do espaço anular para a coluna de produção, diminuindo assim a massa específica da mistura gás-óleo e tornando-a mais leve, e mais fácil da produção ocorrer.
- **Mandril de Injeção Química de Bolso Lateral:** É um mandril para injeção de quaisquer produtos químicos, geralmente para prevenir incrustação.
- **Permanent Downhole Gauge (PDG):** Sensor colocado no fundo do poço que mede pressão e temperatura com grande precisão e confiabilidade. Usado principalmente na fase de produção de petróleo, onde alta pressão e resolução são vitais para conhecer características do poço.
- **Tubing Seal Receptacle (TSR):** É usado para absorver a expansão e contração da coluna por variações de temperatura advindas da produção e injeção de fluidos.
- **Nipple de Assentamento:** Servem para alojar tampões mecânicos, válvulas de retenção ou registradores de pressão e, normalmente são instalados na cauda da coluna de produção, abaixo de todos os outros equipamentos. Embora, quando necessário, pode ser colocado em diferentes pontos da coluna.

- **Âncora Selante Cisalhante:** Equipamento que permite fazer a vedação na área polida do interior de um *Packer Seal Bore* de produção de um poço.
- **Packer:** Ferramenta utilizada para selar o anular da zona produtora, para que isole o intervalo de produção dos fluidos dos anulares dos revestimentos, protegendo-os assim de pressões indesejáveis e de corrosão. Ou seja, pode ser usado para isolar uma zona de interesse, atuar como válvula para controle de pressão, isolar uma zona enquanto seja feita alguma intervenção, facilitar instalação de válvulas quando for feito *shut-in* do poço e ajudar na otimização do fluxo.
- **Pata de Mula e Meia Pata de Mula:** Dispositivo tubular que é passado por dentro da coluna de completação ou revestimento e que se encaixa dentro de uma ferramenta que já foi descida, com o objetivo de facilitar a reentrada pela rotação.
- **Reduções/Conexões:** São equipamentos que propiciam a conexão de um equipamento de diâmetro menor para um de maior, ou vice-versa.

A Figura 5 mostra a representação lateral de um poço de petróleo *offshore* após processo de completação, mostrando os alguns dos principais equipamentos instalados no poço. Esses equipamentos têm a finalidade de garantir segurança operacional e fornecem informações precisas sobre o fluido de produção (petróleo bruto, gás,  $CO_2$  e contaminantes). A partir desses dados é possível escolher a melhor técnica que permita o escoamento do fluido de produção até a cabeça do poço.

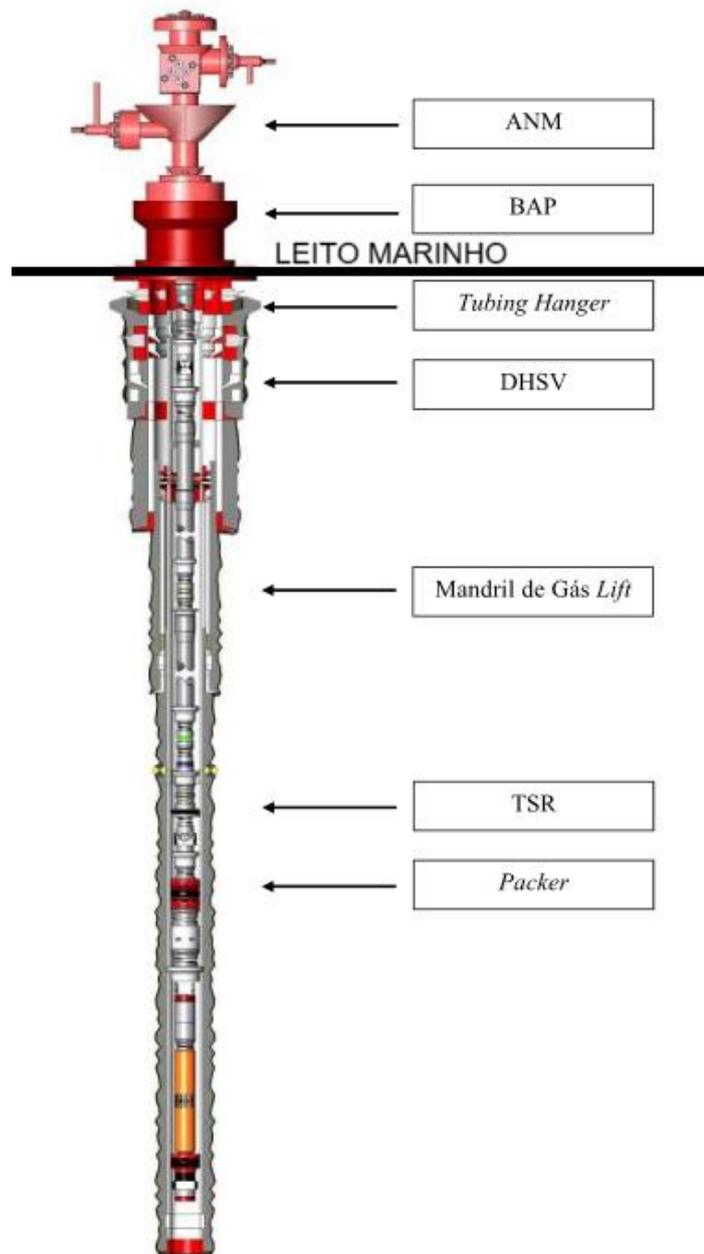
A instalação do SDT-R geralmente é realizada durante a etapa de completação do poço. A fibra óptica protegida é presa e perfilada ao longo da coluna de produção, permitindo a obtenção de um perfil permanente e distribuído da temperatura ao longo de toda a coluna.

A unidade de emissão, detecção e interrogação espacial da fibra (OTDR) e outros equipamentos ficam na superfície, na unidade de exploração e produção (UEP). A Figura 6 mostra um exemplo de instalação do sensor em um poço de petróleo. Nesse caso, a fibra óptica entra pela cabeça do poço (ANM / BAP) e desce

através do espaço anular externo a coluna de produção, atravessando o *packer* até o fundo do poço.

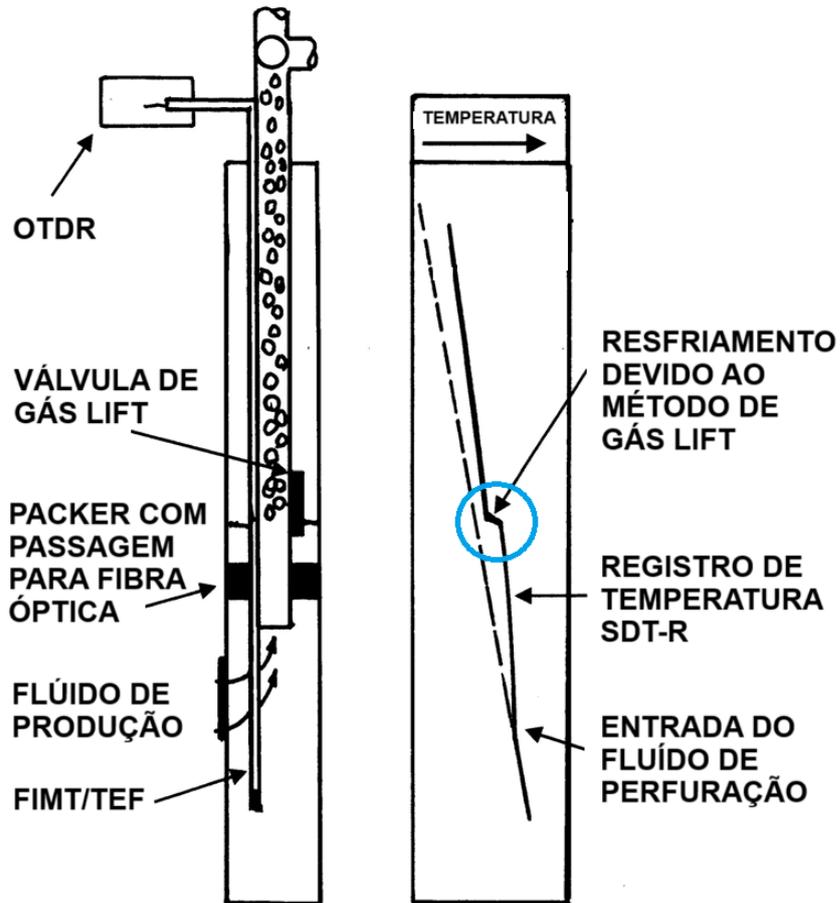
Na Figura 6 também é representado o log de temperatura obtido pelo sensor. Esses dados de temperatura trazem valiosas informações para operação do poço, por exemplo, percebe-se um desvio no gradiente geotérmico no exato ponto da válvula de *gás lift* pois o gás natural injetado tem temperatura menor que o fluido produção.

Figura 5 - Exemplo Genérico de Completação de Poço Molhado.



Fonte: adaptado de (SILVA e FRANCISS, 2019).

Figura 6 - Perfilagem da fibra óptica em poço de petróleo e log de temperatura.



Fonte: adaptado de (SMOLEN e VAN DER SPEK, 2003).

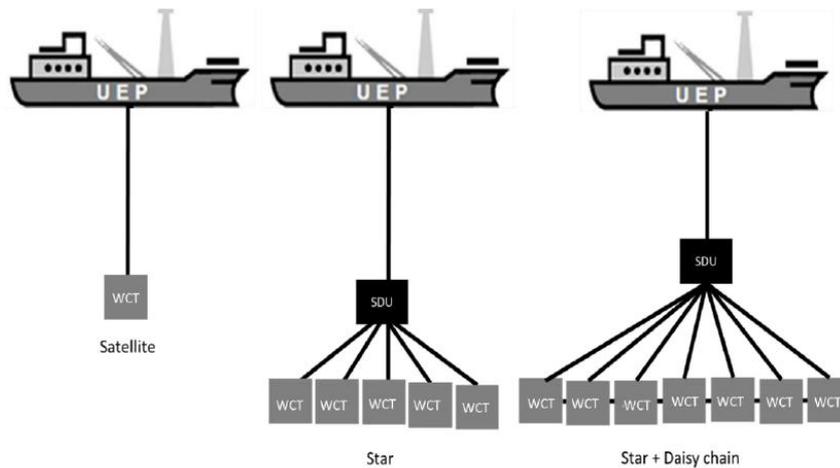
A técnica de *gas lift* é um dos principais métodos de elevação artificial do fluido de produção. A técnica consiste em injetar um gás comprimido dentro do poço, para gaseificar o petróleo que sai do reservatório, diminuindo significativamente sua densidade e melhorando seu escoamento até a superfície.

Diversas configurações de arranjo e perfilagem de fibra óptica podem ser encontradas de acordo com o número de poços conectados à Unidade Estacionária de Produção (UEP) e tecnologia utilizada (PETROBRAS, 2021). A Figura 7 apresenta 3 possíveis configurações de arranjo do sensor distribuído, desde a UEP até a WCT/ANM:

- i. Configuração Satélite (1 poço)
- ii. Umbilical Compartilhado, na configuração estrela (star) (mais de 5 poços)

- iii. Umbilical Compartilhado, na configuração estrela (star) + *daisy chain* (mais de 8 poços)

Figura 7 - Configurações no modo produção.



Fonte: produzido por (PETROBRAS, 2021).

Segundo a especificação técnica Petrobras I-ET-3000.00-1210-276-PW7-005 (PETROBRAS, 2021), todos os cabos ópticos submarinos e conectores devem ser projetados para operar dentro dos seguintes parâmetros:

- i) Temperatura: 4 a 50 °C;
- ii) Pressão máxima de trabalho: 5000 psi (Equivalente a uma coluna de água de 3000m);

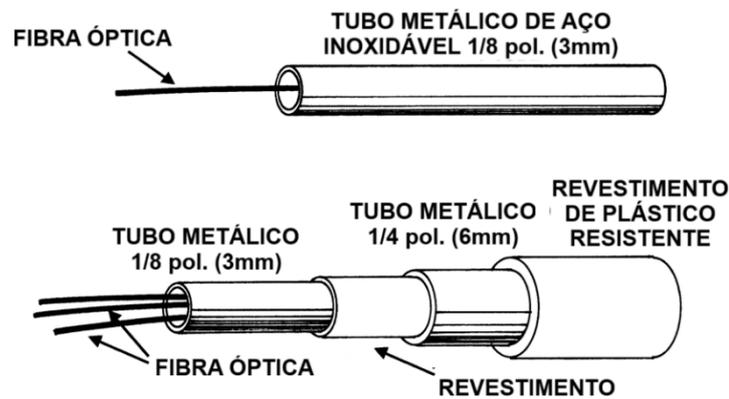
Após a passagem pelo WCT/ANM a fibra estará inserida de fato dentro do poço de petróleo, portanto ela deve ser projetada para operar dentro dos seguintes parâmetros:

- i) Temperatura Operacional: 0 a 135 °C;
- ii) Temperatura mínima: -18 °C;
- iii) Pressão Máxima de trabalho: 15000 psi;

Para utilização do sensor distribuído a fibra óptica dentro do poço de petróleo, é necessário adição de medidas de proteção e robustez devido as condições adversas de poço. Uma das principais medidas tomadas é proteger a fibra óptica contra danos

mecânicos, fluídos, agentes químicos e exposição a alta pressão. Normalmente a fibra óptica é protegida do ambiente de poço, por meio de um, ou vários, tubos de metal. A Figura 8 mostra dois exemplos de proteção mecânica da fibra óptica para uso em poço de petróleo, a primeira com somente um único tubo metálico, e outra com sucessivas camadas e tubos de proteção.

Figura 8 - Técnicas de proteção da fibra óptica.



Fonte: adaptado de (SMOLEN e VAN DER SPEK, 2003).

Para que a fibra esteja adequada para operação em poço de petróleo, ela deve ser protegida com camadas sucessivas de revestimento até chegar entre 500 e 900  $\mu\text{m}$  de diâmetro externo e inserida num tubo de aço inoxidável, que protegerá a fibra contra danos mecânicos, alta pressão e agentes químicos, como mostrado na Figura 8 (SMOLEN e VAN DER SPEK, 2003).

A especificação técnica Petrobras também apresenta os requisitos mínimos para os materiais utilizados na proteção extra com tubos metálicos (FIMT/TEF):

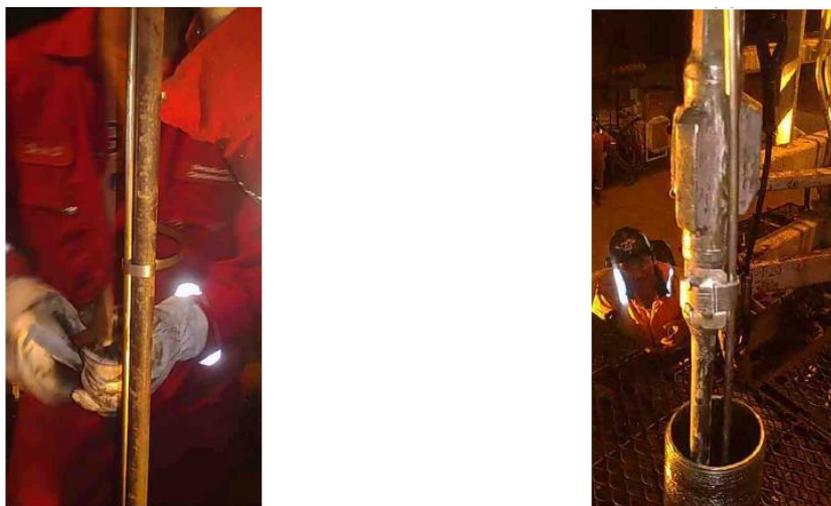
- Acima do packer superior, a metalurgia do FIM/TEF deve ser de níquel 825 ou Super Duplex;
- Abaixo do packer superior, a metalurgia do FIMT/TEF deve ser Super Duplex;
- O material de revestimento não deve inchar quando exposto a hidrocarbonetos;

- O FIMT/TEF deve estar em conformidade com AWE 3362-CCL- *TEF Cable*

Sensores à fibra óptica são aplicados em poços terrestres em alguns projetos piloto da Petrobras desde 2005. Na bacia de Sergipe-Alagoas, o piloto de Castanhal é composto da completação de quatro poços observadores inseridos em um *nine-spot*. O monitoramento visou a zona produtora do campo, localizada cerca de 300 m de profundidade. Foram instaladas fibras multimodo bombeadas ao longo de linhas de controle ancoradas em colunas dispostas no interior dos poços (TRIQUES, RODRIGUES, *et al.*, 2012).

O piloto de Estreito, na bacia do Rio Grande do Norte-Ceará, é formado por quatro poços, dos quais três são produtores e um é injetor contínuo de vapor. Foram instaladas fibras monomodo e testados métodos de instalação usando cabo permanente de fibra óptica e fibra bombeada ao longo de linhas de controle de ¼". Nos produtores, as fibras foram instaladas na parte exterior das colunas de produção, ancoradas a estas empregando-se *clamps*, representado na Figura 9. Devido à inexistência de *packers* para injeção de vapor com passagem para a fibra óptica, para o monitoramento do poço injetor, a fibra teve que ser instalada no interior da coluna de injeção, ancorada por cintas metálicas a uma coluna de hastes com centralizadores de metal que permanece fixa no interior do poço.

Figura 9 - Fotografias da instalação da fibra junto à coluna de produção.



Fonte: produzido por (TRIQUES, RODRIGUES, *et al.*, 2012).

O piloto de Fazenda Alegre, campo localizado no Espírito Santo, é constituído por seis poços, que operam tanto como injetores quanto como produtores, pois o campo emprega injeção cíclica de vapor. Neste piloto, os objetivos são profundos, atingindo cerca de 1500 m.

Assim como no piloto de Estreito, em Fazenda Alegre também foram empregadas fibras ópticas monomodo com núcleo de sílica, de forma a serem menos sujeitas a falhas por ingresso de hidrogênio. O método de instalação selecionado foi o de cabo permanente, que foi ancorado à parte externa da coluna de produção até o liner empregando-se clamps. Os poços foram completados sem o emprego de packer. A escolha por esse tipo de completação se deu tanto pela indisponibilidade no mercado de packers para operação sob injeção de vapor que contenham passagem para o cabo de fibra quanto pela expectativa de que a injeção sem esse elemento não causaria danos consideráveis ao revestimento. Em ambos os pilotos as fibras ópticas chegam à superfície passando por penetrações no suspensor e na árvore de Natal, conforme mostrados na Figura 10.

Figura 10 – Fotografias da passagem da fibra óptica pela ANM.



Fonte: produzido por (TRIQUES, RODRIGUES, *et al.*, 2012).

## 2.6 Métodos de Análise de Confiabilidade

A análise de confiabilidade é obrigatória (em particular para aplicações de Petróleo e Gás) onde os produtos são forçados a suportar processos e condições ambientais extremas (CATELANI, CIANI e VENZI, 2018).

A Análise de Modos de Falhas, Efeitos e Criticidade (FMECA - *Failure Mode, Effects and Criticality Analysis*) foi, primeiramente, introduzida, na década de 1950, pelos militares dos EUA e foi desenvolvido e aplicado pela NASA, na década de 1960, para verificar a confiabilidade de programas espaciais (CATELANI, CIANI e VENZI, 2018). Hoje em dia, torna-se um dos métodos mais poderosos usados para avaliação de riscos e gerenciamento de manutenção.

FMECA é uma das técnicas mais utilizadas para análise de falhas, especialmente durante a fase de concepção de novos sistemas. Este método é um método de análise que começa no nível mais baixo (componente único) e continua analisando até o nível hierárquico superior.

FMECA é composto por duas análises separadas, o Modo de Falha e Análise de Efeitos (FMEA) e Análise de Criticidade (CA). A primeira analisa:

- os prováveis modos de falha do item;
- causas destes modos de falha;
- os efeitos da falha em nível local e global (ou seja, o efeito de cada falha no equipamento/item e em todo sistema);
- as ações corretivas sugeridas para evitar cada falha;

Para alcançar uma classificação de prioridade dos modos de falha e efeitos identificados, a segunda parte da análise (Análise de Criticidade) é realizada. A classificação é obtida usando um índice quantitativo, chamado Número de Prioridade de Risco (RPN – *Risk Priority Number*), dado por

$$RPN = S \cdot O \cdot D \quad (2.2)$$

Onde:

- Severidade S quantifica o impacto do modo de falha no sistema;
- Ocorrência O é a probabilidade de que o modo de falha ocorra;
- Detecção D indica a possibilidade de diagnóstico do modo de falha;

Todos esses índices podem assumir valores no intervalo [1;10]. A Tabela 1 mostra como os valores de S, O e D podem ser atribuídos e o significado de cada pontuação.

Tabela 1 - Avaliação do índice de criticidade.

Índice	S	O	D
1-2	Insignificante	Improvável	Detecção automática, com alarme
3-4	Marginal	Remoto	Detecção automática, sem alarme
5-6	Crítico	Ocasional	Detectada pelo operador
7-8	Muito Crítico	Provável	Impossível detectar pelo operador
9-10	Catastrófico	Frequente	Impossível de detectar

O índice RPN poderá assumir valores entre [1; 1000] e os maiores índices de RPN indicam a necessidade de reparar o modo de falha com maior velocidade e prioridade.

A análise é feita por uma equipe multidisciplinar composta por profissionais envolvidos direta ou indiretamente com o sistema a ser considerado (PETROBRAS, 2012).

A análise é normalmente feita pela identificação dos modos de falha, suas respectivas causas e os efeitos imediatos e finais decorrentes de cada modo de falha. Os resultados analíticos podem ser apresentados numa planilha que contém o núcleo das informações essenciais de todo o sistema e detalhes desenvolvidos para o sistema específico. Um exemplo de planilha FMECA é apresentado na Figura 11.

Na planilha de FMECA, para cada cenário de falha são normalmente registradas e analisadas as seguintes informações:

- a) identificação do item;
- b) função;
- c) modo de falha;
- d) causa da falha;

- e) efeito da falha;
- f) modo de detecção – D;
- g) frequência/ocorrência – O (do modo de falha);
- h) severidade – S (do efeito da falha);
- i) criticidade – RPN;
- j) ações, observações e recomendações.

Figura 11 - Exemplo de Planilha de FMECA.

		FMECA - (ANÁLISE DE MODOS, EFEITOS E CRITICIDADE DE FALHAS)							Gerência:		
Unidade:				Sistema:				Data:			
Subsistema:								Nº Desenho:			
Identificação do item	Função	Modo de falha	Causa da falha	Efeitos no sistema	Modo de detecção	Frequência	Severidade	Criticidade	Ações / Recomendações / Obs.		

Fonte: produzido por (PETROBRAS, 2012).

Segundo a especificação técnica Petrobras I-ET-3000.00-1210-276-PW7-005 (PETROBRAS, 2021), a confiabilidade alvo de um sistema de sensoriamento à fibra óptica offshore (FOS) deve apresentar um nível alvo de confiabilidade. Ele garante que o sistema opere com níveis de confiabilidade e segurança desejáveis. A Tabela 2 apresenta esses valores mínimos requeridos pela norma.

Tabela 2 - Confiabilidade alvo do sistema FOS em poços *offshore*.

Confiabilidade	Nível de Confiança (1-sided lower)	Tempo até a primeira falha (anos)
97%	80%	10 (componentes reparáveis)
90%	80%	27 (componentes permanentes)

Notas:

- i) Definição de falha:

- a. Perda de medição;
  - b. Perda de integridade da FIMT/TEF;
- ii) A estimativa de confiabilidade pode ser obtida a partir de testes quantitativos de confiabilidade ou de dados de campo;
  - iii) Deve ser realizada uma análise FMECA para assegurar a relação dos testes de confiabilidade e os modos e mecanismos de falha relevantes;
  - iv) No caso da estimativa de confiabilidade vir de dados de campo, somente o mesmo cenário de aplicação deverá ser considerado;
  - v) Deve ser fornecida a distribuição de probabilidade utilizada para a estimativa de confiabilidade, bem como dados e informações suficientes para reproduzir os resultados.

### 3 METODOLOGIA

Neste capítulo, é detalhada a metodologia de avaliação do desempenho principais do sensor SDT-R, critério de falha e os desafios enfrentados para aplicações em projetos da indústria do petróleo.

#### 3.1 Análise FMECA do SDT-R

Para classificar os principais tipos de falhas que podem ocorrer ao sensor distribuído em aplicações de sensoriamento de temperatura dentro de um poço de petróleo, foi utilizada um método de análise de confiabilidade chamado FMECA (*Failure Mode, Effect and Criticality Analysis*), que permite avaliar, a partir de um determinado modo de falha, as respectivas causas e consequências, assim como os meios de detecção e prevenção dos modos de falha, criticidade e de mitigação de seus efeitos. Através de três fatores (ocorrência, detecção e severidade), foi realizada uma hierarquização de acordo com o risco potencial da falha, visando um melhor acompanhamento dos principais modos de falha. A análise FMECA do SDT-R encontra-se no Apêndice A.

O FMECA identificou a fibra óptica como o componente mais crítico do sensor em termos de confiabilidade, devido ao seu contato direto com as condições extremas encontradas no ambiente de um poço de petróleo, como altas temperaturas, pressões elevadas e a presença de agentes químicos agressivos.

As condições adversas no interior do poço de petróleo promovem tanto a degradação mecânica quanto química da fibra óptica, o que resulta em um aumento significativo na atenuação óptica e no risco de falhas mecânicas. A atenuação óptica, que está relacionada à perda de intensidade do sinal de luz que viaja através da fibra, pode ser amplificada pela exposição contínua às condições extremas de pressão, temperatura e agentes químicos. Além disso, a falha mecânica da fibra, que pode envolver rupturas ou rachaduras devido ao estresse mecânico e térmico, representa um risco crítico para o desempenho do sistema.

Além da degradação mecânica, outro modo de falha que compromete a confiabilidade da fibra óptica, e que ainda recebe atenção crescente, é a difusão de

hidrogênio no núcleo da fibra. O hidrogênio presente no ambiente do poço de petróleo pode infiltrar-se na fibra óptica, afetando sua integridade estrutural e suas propriedades ópticas, o que prejudica ainda mais o desempenho do sistema de sensoriamento.

A análise FMECA mostrou que o desempenho da fibra óptica em ambiente de poço de petróleo é influenciado por diversos fatores, que incluem:

- **Difusão de hidrogênio:** O hidrogênio pode se difundir no núcleo da fibra, alterando suas propriedades ópticas e aumentando a atenuação. Esse fenômeno é particularmente problemático em ambientes de poços de petróleo, onde o hidrogênio está frequentemente presente devido aos processos de extração e à composição química dos fluidos.
- **Resistência térmica dos materiais:** As altas temperaturas presentes no interior do poço de petróleo são um dos principais fatores de degradação da fibra óptica. Materiais com resistência térmica inadequada podem sofrer danos irreversíveis, afetando diretamente a durabilidade e a funcionalidade do sistema óptico.
- **Resistência mecânica da fibra:** As forças de compressão, tração e vibrações constantes nas operações no fundo do poço também podem afetar a integridade estrutural da fibra óptica, resultando em falhas mecânicas que podem comprometer a operação do sensor.

A degradação da fibra óptica no ambiente de um poço de petróleo devido ao estresse térmico tornou-se o foco central deste trabalho. A análise detalhada desse modo de falha e a implementação de soluções de engenharia adequadas são fundamentais para garantir a confiabilidade dos sistemas de sensoriamento em ambientes tão agressivos e desafiadores como poços de petróleo.

### **3.2 Testes Acelerados de Temperatura**

Para avaliar o desempenho da fibra óptica em altas temperaturas, foi desenvolvido uma metodologia de testes acelerados de temperatura. O conceito do teste acelerado é comprimir o tempo de execução do experimento e acelerar o

mecanismo de falha em um período de teste razoável para que a confiabilidade do produto possa ser avaliada.

O objetivo do teste qualitativo é identificar as fraquezas do produto, encontrar e estudar cuidadosamente a causa raiz da falha e avaliar se o modo de falha pode ocorrer em condições usuais ou não. Quando for determinado que uma falha pode acontecer em uso real, é necessário alterar o projeto de fabricação ou escolha de materiais para eliminar a fonte desta falha.

Foram realizados primeiramente testes acelerados qualitativos de temperatura no sensor distribuído, com o objetivo principal de revelar prováveis limites de temperatura na qual ocorre a degradação da fibra e surgimento dos modos de falha do sensor.

O critério de falha utilizado nesse teste foi a perda do revestimento da fibra óptica, um dos principais modos de falha apontado pela análise FMECA. A perda do revestimento expõe a fibra ao ambiente externo e aumenta significativamente a probabilidade de quebra por estresse mecânico.

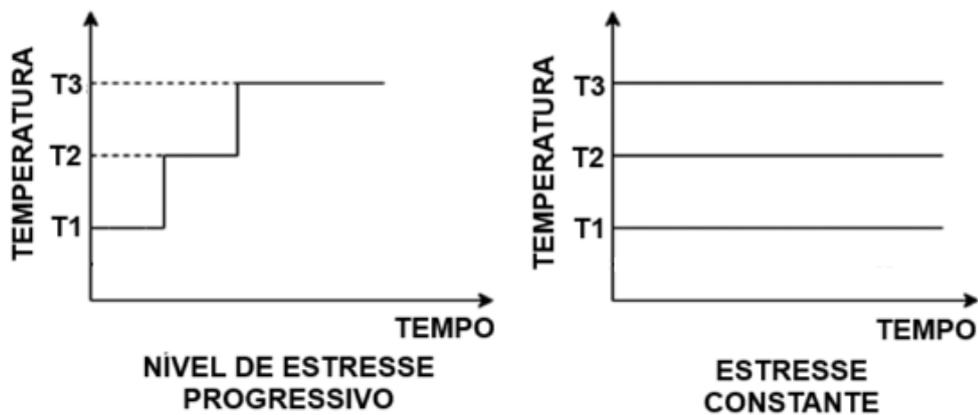
Para avaliar o critério de falha, foi realizada a microscopia da fibra óptica com a finalidade de verificar a perda do revestimento, redução do diâmetro da fibra óptica, danos e separações do revestimento.

Foram propostos dois protocolos de testes para acelerar a degradação do revestimento da fibra, e estão apresentados na Figura 12.

- **Nível de Estresse Progressivo:** Neste protocolo experimental, a fibra é aquecida numa temperatura constante ao longo de toda duração do teste. Após esse aquecimento, a fibra é resfriada até alcançar a temperatura ambiente. Em seguida, é realizada uma análise microscópica para verificar a presença de falhas ou alterações na estrutura da fibra. Caso não for observado falhas ou danos, o processo de aquecimento é repetido, mas desta vez a fibra será exposta a uma temperatura superior à anterior. Esse procedimento de aumento progressivo da temperatura visa avaliar a resistência da fibra a diferentes níveis térmicos e determinar em que faixa de temperatura surgem os modos de falha.
- **Estresse Constante:** No protocolo de estresse constante, a fibra é exposta a uma temperatura constante durante todo período de teste, similar ao processo descrito no Nível de Estresse Progressivo. Após o período de aquecimento, a

fibra é resfriada até a temperatura ambiente, e, então, realizada uma análise microscópica minuciosa para verificar a presença de falhas ou danos. Caso não for observado falhas, o aquecimento será repetido utilizando a mesma temperatura, sem aumento no nível térmico. Este método visa observar o comportamento da fibra sob a manutenção de uma temperatura constante durante múltiplos ciclos, permitindo uma análise da sua resistência a longos períodos de exposição térmica sem variações de temperatura.

Figura 12 - Protocolos de Estresse.



Fonte: adaptado de (KUMAR MAHTO, DEY e TRIPATHI, 2019)

## 4 MONTAGEM E TESTES EXPERIMENTAIS

Neste capítulo é apresentada a montagem do sensor experimental para análise de confiabilidade e execução de testes acelerados de vida no enlace de fibra óptica. Esse sensor experimental foi montado no laboratório de Fotônica do Departamento de Eletrônica e Sistemas (DES) da UFPE.

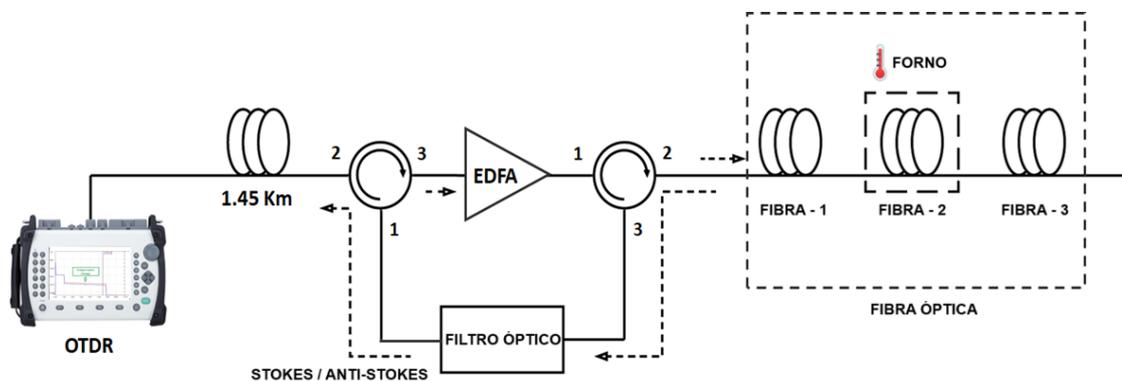
### 4.1 Montagem experimental do sensor SDT-R

A configuração experimental do sensor de temperatura distribuído baseado em Espalhamento Raman utilizando OTDR comercial e amplificação à fibra dopada com Érbio padrão foi proposta por PEIXOTO E SILVA (2018), e seu esquema está descrito na Figura 13.

Os principais componentes do sensor são:

- i) OTDR (unidade de emissão, detecção e interrogação espacial da fibra);
- ii) Amplificador óptico: fibra dopada com Érbio (EDFA);
- iii) Enlace de fibra óptica sensor;
- iv) Filtro óptico;
- v) Circuladores ópticos;

Figura 13 - Esquema de montagem experimental do sensor.



Fonte: adaptado de (PEIXOTO E SILVA, 2018).

Neste sistema, o OTDR operando à 1550 nm emite pulsos de luz que são amplificados pelo EDFA e injetados no link sensor através de um circulador óptico. Os pulsos de luz amplificados, ao se propagarem pela fibra óptica, estimulam a ocorrência do espalhamento Raman Espontâneo. Um carretel de fibra monomodo padrão com comprimento de 1,45Km foi inserido no início do sistema para evitar a região de zona morta do OTDR no enlace de detecção.

Dois circuladores ópticos de três portas (CIRC 1, CIRC 2) compõem um circuito de envio e retorno. Os circuladores direcionam a propagação de luz e funcionam como isolares no sentido contrário de propagação, ou seja, transmitem o sinal de 1 para 2 e de 2 para 3, e atenuam significativamente o sinal de 2 para 1 e de 3 para 2 (ver Figura 13). Desse modo, os circuladores bloqueiam sinais refletidos entre CIRC1 e CIRC2 e direcionam o sinal retroespalhado, gerado na fibra sob teste, de volta para o OTDR após passar pelo filtro óptico, que separa o sinal Stokes e Anti-Stokes para serem medidos.

O link de fibra óptica sensora foi composto por três carretéis de fibra monomodo padrão (Fibra-1, Fibra-2 e Fibra-3). O carretel Fibra-2 foi inserido em um forno de temperatura de aquecimento controlada e ótimo isolamento térmico. O valor do comprimento dos carretéis Fibra-1, Fibra-2, Fibra-3 foram variados ao longo das medições e compõem um enlace óptico mínimo de 27 Km.

A partir dessa montagem experimental foi possível detectar os sinais retroespalhados Raman anti-Stokes e Stokes e obter a medição detalhada da temperatura ao longo de toda extensão da fibra. O sensor experimental, devidamente montado em bancada é apresentado na Figura 14.

O desempenho do sensor distribuído varia para pulsos-OTDR com largura diferente. Quando são utilizados pulsos de 100 ns o sensor tem uma faixa de medição aproximadamente de 15 km com resolução de 5 °C. Quando o OTDR emite pulsos de 4000 ns, o alcance é melhorado em cerca de 11,5 km, com resolução de 10 °C, chegando à faixa de medição de 26,5 km (PEIXOTO E SILVA, 2018). Em relação à resolução espacial, os resultados mostram que o sensor é capaz de identificar variações de intensidade do sinal retroespalhado Raman anti-Stokes em extensões tão pequenas quanto 2 metros (PEIXOTO E SILVA, 2018).

Figura 14 - Montagem do Sensor Experimental.



Fonte: produzido pelo autor.

## 4.2 Fibras utilizadas durante o teste acelerado

### i. Fibra monomodo com revestimento de acrilato:

A fibra óptica monomodo, padrão de telecomunicação, com camada dupla de revestimento de acrilato (DLPC), mostrada na Figura 15, possui as seguintes características:

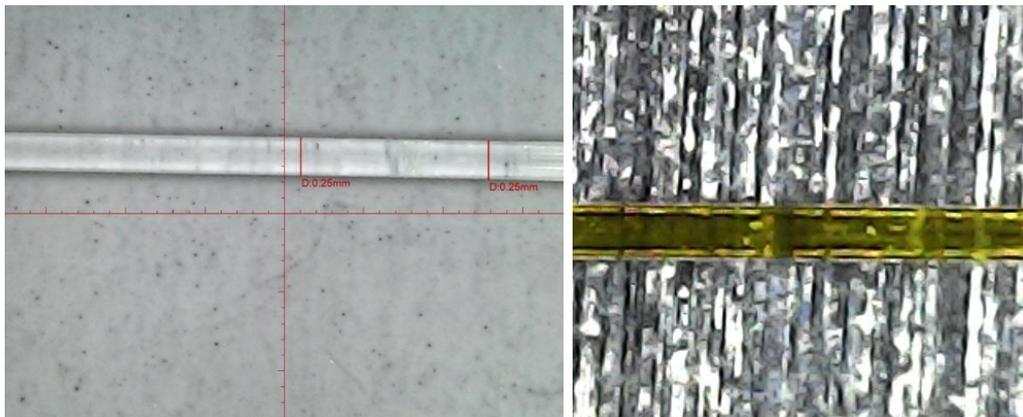
- SMF DLPC9
- Fabricante: Draka
- Revestimento: Acrilato
- Características Geométricas:
  - Diâmetro do Núcleo: 9  $\mu\text{m}$
  - Diâmetro da Bainha/*Cladding*: 125  $\pm$  0,7  $\mu\text{m}$
  - Diâmetro do Revestimento/*Coating*: 242  $\pm$  7  $\mu\text{m}$
- Temperatura de Operação: -55 a 85  $^{\circ}\text{C}$

### ii. Fibra monomodo com revestimento de poli-imida:

A fibra com revestimento especial para alta temperatura de poli-imida, possui as seguintes características:

- SM1550P
- Fabricante: Thor Labs
- Tipo: Monomodo
- Revestimento: Poli-imida
- Características Geométricas:
  - Diâmetro do Núcleo:  $9,0 \pm 0,5 \mu\text{m}$
  - Diâmetro da Bainha/Cladding:  $125 +1 / -3 \mu\text{m}$
  - Diâmetro do Revestimento:  $145 \pm 5 \mu\text{m}$
- Temperatura de Operação:  $-190$  a  $350 \text{ }^\circ\text{C}$

Figura 15 - Fibra óptica com revestimento de acrilato (esquerda) e Fibra óptica com revestimento de poli-imida (direita).



Fonte: produzido pelo autor.

## 5 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Foram executados os protocolos de teste acelerado explicitados na etapa de metodologia. A análise dos resultados obtidos durante a execução dos testes está descrita neste capítulo do trabalho.

### 5.1 Nível de Estresse Progressivo, 110/135/160/185/210 °C, 30h

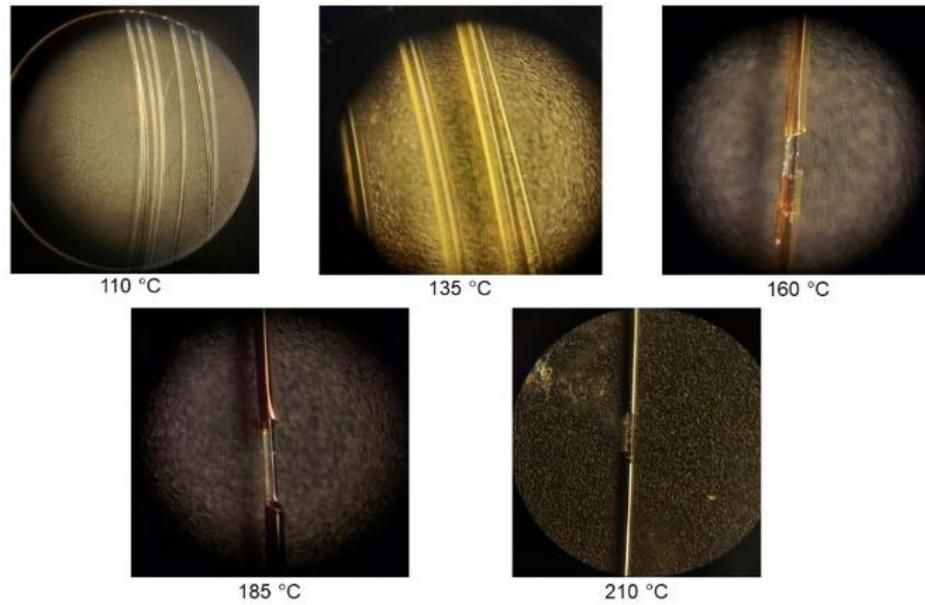
O protocolo Nível de Estresse Progressivo foi executado com níveis de temperatura crescentes. Foi escolhido valores de 110 °C, 135 °C, 160 °C, 185 °C e 210 °C, e duração de 6 horas em cada intervalo de temperatura, totalizando 30 horas de teste. A escolha dessas temperaturas baseou-se na temperatura de fusão do acrilato, material utilizado como revestimento da fibra, que é aproximadamente 160 °C. Logo escolheu-se valores de temperatura acima e abaixo da temperatura de fusão. Somente foram utilizadas fibras com revestimento de acrilato durante esse teste.

Durante o teste, a fibra óptica com revestimento de acrilato resistiu à exposição a 110 °C e 135 °C por 6 horas cada, sem apresentar falhas no revestimento. No entanto, após a exposição a 160 °C, observou-se uma alteração na coloração do revestimento, e em algumas regiões o revestimento sofreu rachaduras axiais, resultando na exposição da bainha da fibra óptica. A perda do revestimento pode ser visualizada na Figura 16.

Quando as fibras foram expostas a 185 °C e 210 °C, os efeitos se intensificaram drasticamente, resultando no derretimento e separação axial do revestimento da fibra óptica. Além disso, foi possível notar a diminuição do diâmetro externo da fibra óptica, o que indicou uma perda de massa e diminuição significativa do revestimento em altas temperaturas.

Ao analisar o desempenho do teste acelerado para temperaturas acima do ponto de fusão do acrilato, percebeu-se que esses valores de temperaturas deveriam ser descontinuados para o teste de estresse constante, pois esse nível de teste acelerado poderia induzir modos de falha inexistentes por estar muito acima do valor limite operacional do material.

Figura 16 - Degradação fibra óptica sob estresse térmico.



Fonte: próprio autor.

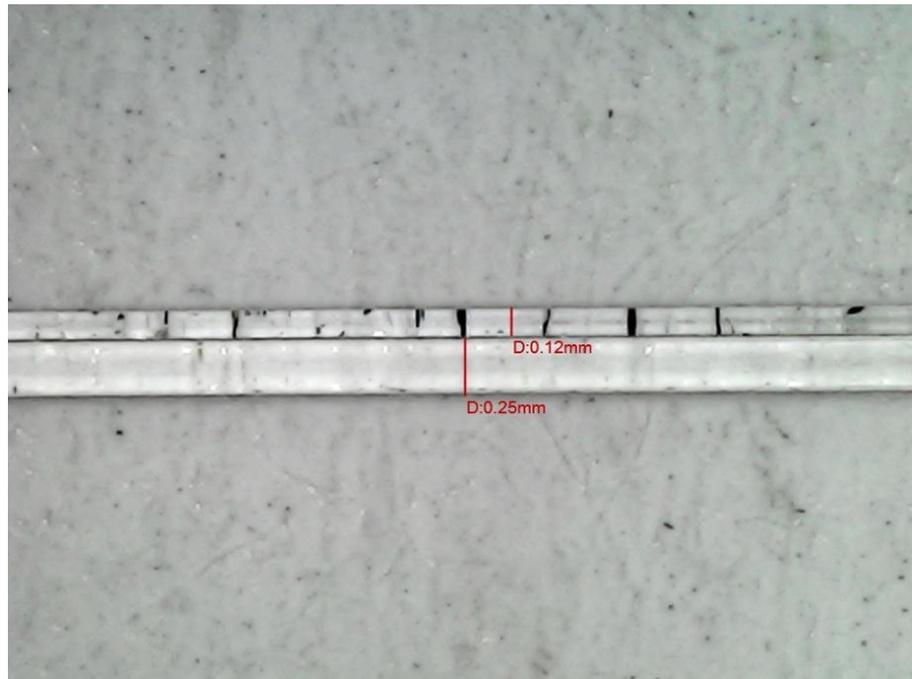
A Figura 17 apresenta alguns exemplos da degradação térmica do revestimento da fibra óptica com revestimento de acrilato. Após a temperatura de fusão do material, o acrilato começa a derreter e as separações axiais são evidenciadas. A Figura 18 mostra uma fibra óptica com total degradação térmica do revestimento de acrilato ao lado de uma fibra óptica em perfeito estado.

Figura 17 - Exemplos de degradação da fibra com revestimento de acrilato.



Fonte: produzido pelo autor.

Figura 18 - Fibra com revestimento x Fibra sem revestimento.



Fonte: produzido pelo autor.

## 5.2 Estresse Constante, 150 °C, 36h

O protocolo Estresse Constante foi executado com temperatura fixa de 150 °C, com duração total de 36 horas. Essa temperatura foi definida pelo resultado do teste progressivo. A cada 4h a fibra foi retirada do forno e realizada a microscopia para analisar a degradação temporal do revestimento e constatar a perda de massa, representada pela redução do diâmetro externo da fibra. A relação entre a duração do teste e temperatura do teste, foi definida para que não houvesse testes de longa duração e que o critério de falha pudesse ser observado. Somente foram utilizadas fibras com revestimento de acrilato durante esse teste.

A fibra que originalmente possuía o diâmetro externo de 250  $\mu\text{m}$  e característica transparente, após 4h de aquecimento teve sua cor alterada e diâmetro externo reduzido para 230  $\mu\text{m}$ , conforme mostrado na Figura 19.

Figura 19 - Microscopia em 4h.



Fonte: produzido pelo autor.

Após 8h de aquecimento, houve uma redução do diâmetro externo da fibra para 210  $\mu\text{m}$  e foram identificados os primeiros pontos de separação axial do revestimento, conforme mostrado na Figura 20.

Essa separação resulta na exposição da bainha (*cladding*) da fibra óptica, que é composto de vidro com índice de refração maior que o núcleo, e tem a função de confinar a luz dentro da fibra. Como a sílica tem maior estabilidade térmica (ponto de fusão:  $>1700\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), não sofre com alteração de cor ou perda de massa, mantendo seu diâmetro externo de aproximadamente 120  $\mu\text{m}$ .

Figura 20 - Microscopia em 8h.



Fonte: produzido pelo autor.

Após 12h de aquecimento a fibra atingiu 200  $\mu\text{m}$  de diâmetro externo e sua coloração continuou escurecendo, efeitos relacionados à perda de massa, conforme mostrado na Figura 21.

A partir de 16h de aquecimento a taxa de perda de massa diminuiu e o diâmetro externo da fibra se estabilizou entre 190 e 180  $\mu\text{m}$ , conforme apresentado na Figura 22, Figura 23, Figura 24, Figura 25, Figura 26 e Figura 27.

Apesar da estabilização do diâmetro externo da fibra óptica, em diversos pontos houve a separação axial do revestimento e exposição do núcleo e bainha. Caracterizando a ocorrência do critério de falha previamente estabelecido durante a metodologia.

Figura 21 - Microscopia em 12h.



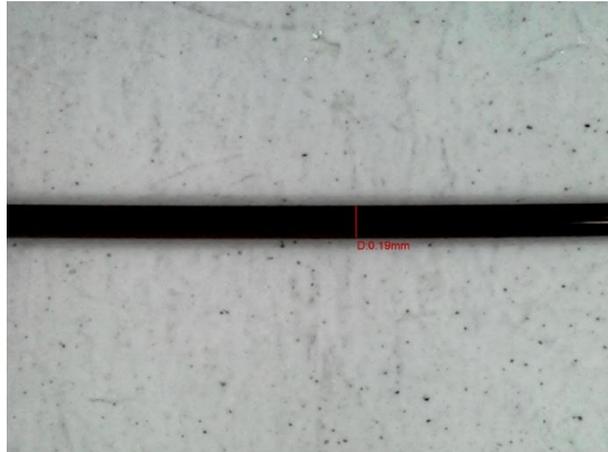
Fonte: produzido pelo autor.

Figura 22 - Microscopia em 16h.



Fonte: produzido pelo autor.

Figura 23 - Microscopia em 20h.



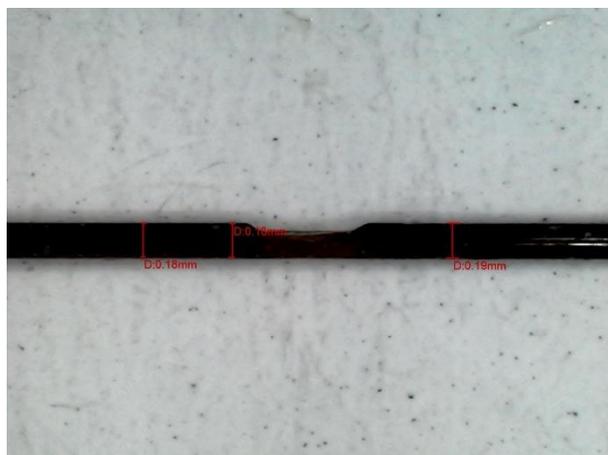
Fonte: produzido pelo autor.

Figura 24 - Microscopia em 24h.



Fonte: produzido pelo autor.

Figura 25 - Microscopia em 28h.



Fonte: produzido pelo autor.

Figura 26 - Microscopia em 32h.



Fonte: produzido pelo autor.

Figura 27 - Microscopia em 36h.



Fonte: produzido pelo autor.

Como o critério de falha foi atingido durante o teste, é possível concluir que a fibra óptica com camada dupla de revestimento de acrilato não é apropriada para utilização em temperaturas superiores a 150 °C. Sendo necessário a utilização de fibras com revestimento especial para altas temperaturas em aplicações de poço de petróleo.

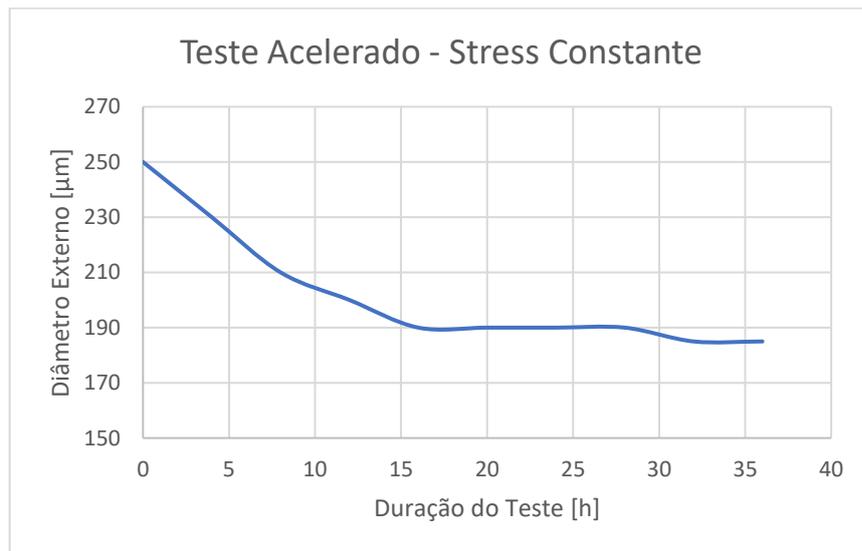
A Tabela 3 e Figura 28 mostram a redução temporal do diâmetro externo da fibra óptica durante o teste de estresse constante.

Tabela 3 - Degradação temporal do revestimento à 150 °C.

Resultado da microscopia		
Tempo (h)	Diâmetro ( $\mu\text{m}$ )	Redução ( $\mu\text{m}$ )
0	250	0
4	230	20
8	210	40
12	200	50
16	190	60
20	190	60
24	190	60
28	190	60
32	185	65
36	185	65

Fonte: próprio autor.

Figura 28 - Diâmetro externo da fibra durante o teste.



Fonte: próprio autor.

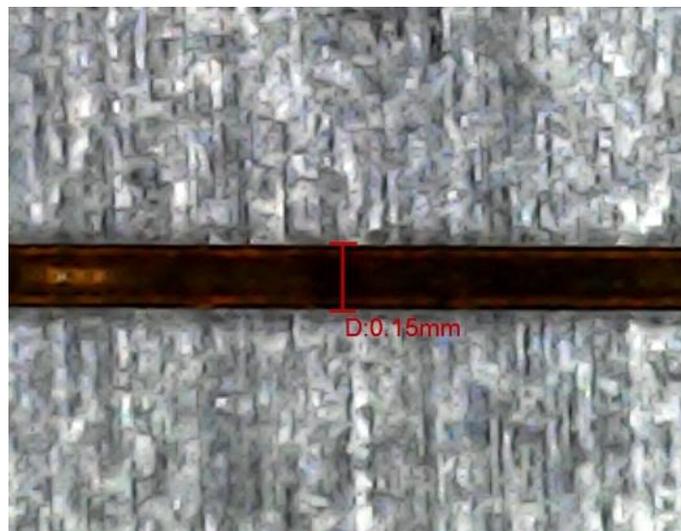
### 5.3 Estresse Constante, 350 °C, 4h

O protocolo Estresse Constante foi executado com temperatura fixa de 350 °C, com duração total de 4 horas. Essa temperatura foi escolhida por ser a máxima temperatura de operação apresentada pelo fabricante. Foi introduzido no forno uma parte de 10 cm de fibra com revestimento de poli-imida e uma parte de 10cm de fibra com revestimento de acrilato. Após o teste, foi realizada a microscopia para analisar e comparar a degradação do revestimento e redução do diâmetro externo da fibra das duas amostras.

A fibra com revestimento de acrilato sofreu uma redução no diâmetro de 250  $\mu\text{m}$  para 150  $\mu\text{m}$ , conforme apresentado na Figura 29. Já a fibra com revestimento de poli-imida (Figura 30) não houve degradação, separação axial, ou redução aparente no diâmetro externo da fibra, permanecendo dentro da faixa especificada pelo fabricante,  $145 \pm 5 \mu\text{m}$ .

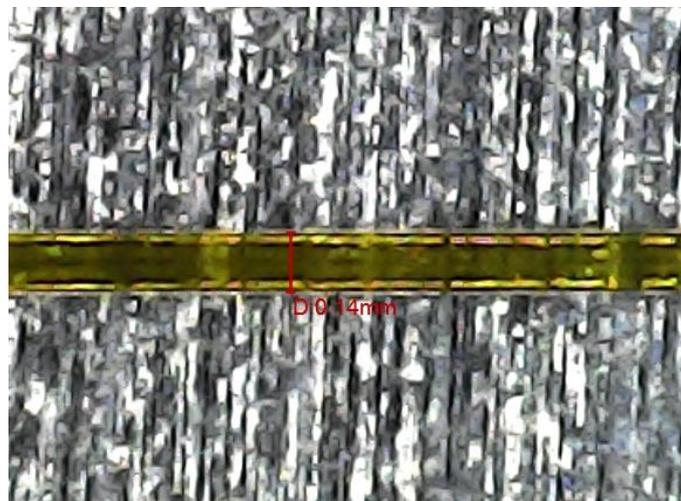
Os resultados obtidos com fibra especial com revestimento de poli-imida indicam seu grande potencial para aplicações em alta temperatura, especialmente em poços de petróleo, apresentando uma estabilidade térmica superior à fibra com revestimento de acrilato.

Figura 29 - Fibra com revestimento de acrilato após teste.



Fonte: próprio autor.

Figura 30 - Fibra com revestimento de poli-imida após teste.



Fonte: próprio autor.

## 6 CONCLUSÃO E PROPOSTAS DE CONTINUIDADE

Este trabalho apresentou a análise de confiabilidade e desafios de aplicações do sensor distribuído de temperatura em poços de petróleo. Através da execução de testes acelerados de temperatura, foi possível identificar e avaliar os principais modos de falha em condições de alta temperatura.

Neste trabalho, a implementação do SDT-R em poços de petróleo foi apresentada em detalhes, onde todos os elementos do sensor e métodos de instalação foram caracterizados. Após a descrição da configuração experimental do sensor, foi executado o FMECA para classificar os principais modos de falha em sua aplicação em poços. A partir disso, foram apresentados os protocolos de teste acelerado de temperatura para avaliar a degradação do revestimento da fibra óptica sob alta temperatura.

Primeiramente, foi avaliado o desempenho da fibra com revestimento de acrilato através dos testes de nível de estresse progressivo e estresse constante. Os resultados obtidos indicaram que esse tipo de revestimento não é apropriado para utilização em poços de petróleo, pois o critério de falha foi alcançado durante os testes.

O teste também foi executado utilizando fibra óptica com revestimento de poli-imida. Com esse material, foi possível ter um ótimo desempenho, do ponto de vista de estabilidade térmica e não foi identificado redução no seu diâmetro externo. A fibra com revestimento de poli-imida provou ser uma alternativa para aplicações em poço de petróleo.

Esses resultados mostram que a utilização de sensoriamento distribuído a fibra óptica em aplicações de poços ainda possui alguns desafios estruturais para sua aplicação. Podemos resumir os desafios em:

- Definição de materiais para revestimento de fibra óptica que suporte altas temperaturas;
- Disponibilizar com integridade a fibra óptica da unidade de produção até a ANM;
- Equipar o cabo umbilical e equipamentos submarinos para a passagem da fibra óptica;

- Disponibilizar conector da interface ANM/TH e interior do poço, com sistema de conexão e desconexão;
- Disponibilizar infraestrutura para gerenciar grandes volumes de dados em tempo real nas unidades de produção, incluindo sua transmissão para terra e conversão dos dados de engenharia em interface amigável para a tomada de decisão;
- Avaliar os requisitos de acoplamento e metrológicos SDT-R em função das restrições de instalação e das configurações de completação;

Mesmo com esses desafios, a tecnologia de SDT-R pode ser uma solução eficiente e confiável para sensoriamento em ambientes desafiadores e de alta complexidade, como os encontrados no setor de O&G e no setor de elétrico.

O sensor possui diversas aplicações no setor elétrico, para monitoramento de temperatura em linhas de transmissão aéreas e subterrâneas. É possível detectar queimadas próximas a linhas de transmissão, saber o local exato de incidência de descargas atmosféricas, detectar o local do curto-circuito (UKIL, BRAENDLE e KRIPPNER, 2012). Nas linhas de transmissão subterrâneas, cabos subterrâneos com fibra óptica acoplada permitem o monitoramento de temperatura e identificação exata de pontos de calor. Com os dados de temperatura é possível prever falhas no isolamento do cabo, realizar planejamento de manutenção e reparação de linhas de transmissão subterrâneas.

Como continuação deste trabalho, as seguintes propostas são sugeridas:

- Avaliar o desempenho de outros tipos de revestimentos de fibra óptica especiais para alta temperatura;
- Propor e executar protocolos de testes com modos de falha simultâneos (pressão, temperatura e agentes químicos);
- Executar testes acelerados quantitativos, com a finalidade de estimar a confiabilidade do sensor;
- Avaliar a aplicação do sensor SDT-R em soluções na área de transmissão de energia elétrica (medição de temperatura em linhas de transmissão aéreas e subterrâneas);

## REFERÊNCIAS

- AGRAWAL, Govind P. **Fiber-Optic Communication Systems**. 4<sup>a</sup>. ed.
- BAO, X.; CHEN, L. Recent progress in distributed fiber optic sensors. **Sensors**, v. 12, n. 7, 2012. ISSN 8601-8639.
- BOLOGNINI, Gabriele; HARTOG, Arthur. Raman-based fibre sensors: Trends and applications. **Optical Fiber Technology**, v. 19, n. 6, Part B, p. 678-688, 2013. ISSN 1068-5200.
- BROWN, George A.; HARTOG, Arthur. Optical Fiber Sensors in Upstream Oil & Gas. **Journal of Petroleum Technology**, n. SPE 79080, 2002.
- CATELANI, M.; CIANI, L.; VENZI, M. Failure modes, mechanisms and effect analysis on temperature redundant sensor stage. **Reliability Engineering and System Safety**, v. 180, p. 425-433, 2018. ISSN 0951-8320.
- DANIELSON, B. L. **Backscatter measurements on optical fibers**.
- DANIELSON, B. L. **Optical Fiber Characterization: Backscatter time domain bandwidth**.
- HEADLEY, Clifford; AGRAWAL, Govind P. **Raman Amplification in Fiber Optical Communication Systems**. 1<sup>a</sup>. ed.
- HECHT, Eugene. **Optics**. Fifth Edition. ed.
- JOHNY, Jincy; AMOS, Solomon; PRABHU, Radhakrishna. Optical Fibre-Based Sensors for Oil and Gas Applications. **Sensors**, v. 21, n. 18, p. 6047, 2021.
- KAURA, Jiten; SIERRA, Jose. Successful Field Application in Continuous DTS Monitoring Under Harsh Environment of SAGD Wells Using New Optical-Fiber Technology: Case Study From Canada. **SPE Annual Technical Conference and Exhibition**, Denver, Colorado, USA, 2008.
- KEISER, Gerd. **Comunicações por Fibras Ópticas**. 4<sup>a</sup>. ed.
- KERSEY, A.; DANDRIDGE, A. Distributed and multiplexed fibre-optic sensor systems. **Journal of the Institution of Electronic and Radio Engineers**, v. 58, n. 5S, p. 99-111, 1988.
- KUMAR MAHTO, Amulya; DEY, Sanku; TRIPATHI, Yogesh. Statistical inference on progressive-stress accelerated life testing for the Logistic exponential distribution under progressive type-II censoring. **Quality and Reliability Engineering**, 2019. 1-13.
- PEIXOTO E SILVA, Marianne S. **Sensor Distribuído de Temperatura à Fibra Óptica**. Dissertação (Mestrado) – CTG, Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Pernambuco. Recife, p. 84. 2018.
- PETROBRAS. **Técnicas Aplicáveis à Engenharia de Confiabilidade**. CONTEC. Rio de Janeiro, p. 18. 2012. (N-2781).
- PETROBRAS. **FIBER OPTIC SENSING FOR SUBSEA WELLS**. DTDI-CENPES/PDIDP/EPOCOS. Rio de Janeiro, p. 43. 2021. (I-ET-3000.00-1210-276-PW7-005).
- RAMAN, C. V.; KRISHNAN, K. S. A New Type of Secondary Radiation. **Nature**, v. 121, p. 501-502, 1928.
- ROGERS, Alan J. et al. Advances in distributed optical fibre sensing. **European Workshop on Optical Fibre Sensors**, v. 3483, p. 5-10, 1998.
- SILVA, Débora Y. C. A.; FRANCISS, Ricardo. A COMPLETAÇÃO DE POÇOS DE PETRÓLEO – UMA REVISÃO DO PLANEJAMENTO DAS OPERAÇÕES E

EQUIPAMENTOS. **Revista de Engenharia da Universidade Católica de Petrópolis - REUCP**, Petrópolis, v. 13, n. 1º, p. 26-39, 2019. ISSN 2318-0692.

SINGH, Sunil P.; GANGWAR, Ramgopal; SINGH, Nar. NONLINEAR SCATTERING EFFECTS IN OPTICAL. **Progress in Electromagnetics Research-pier - PROG ELECTROMAGN RES**, v. 74, p. 379–405, 2007.

SMOLEN, James J.; VAN DER SPEK, Alex. **Distributed Temperature Sensing. A DTS Primer for Oil & Gas Production - Shell**. [S.l.], p. 97. 2003.

STOLOV, Andrei A. et al. Behavior of Specialty Optical Fibers in Crude Oil Environment. **Journal of Lightwave Technology**, v. 38, n. 14, p. 3759-3768, 2020.

STOLOV, Andrei A.; SIMOFF, Debra A.; LI, Jie. Thermal Stability of Specialty Optical Fibers. **Journal of Lightwave Technology**, v. 26, n. 20, p. 3443-3451, 2008.

TRIQUES, Adriana L. C. et al. **TECNOLOGIA DTS – AVALIAÇÃO EM PILOTOS DE INJEÇÃO DE VAPOR NA PETROBRAS**. Rio Oil & Gas Expo and Conference 2012. Rio de Janeiro: [s.n.]. 2012. p. 1-8.

UKIL, Abhisek; BRAENDLE, Hubert; KRIPPNER, Peter. Distributed Temperature Sensing: Review of Technology and Applications. **IEEE Sensors Journal**, v. 12, n. 5, p. 885-892, May 2012.

VENÂNCIO, P. et al. Sensores de corrosão para aeronaves. **Corrosão e Protecção de Materiais**, v. 28, n. 3º, p. 78-86, 2009.

WANG, C. et al. **High-Performance Hermetic Optical Fiber for Downhole Applications**. Paper presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Houston, Texas: [s.n.]. 2004.

YIN, S. S.; RUFFIN, P. **Fiber optic sensors**. 1ª. ed.

# APÊNDICES

## APÊNDICE A – FMECA SDT-R EM AMBIENTE DE POÇO

FMEA: PROJETOPROCESSO		ÁREAS ENVOLVIDAS:		APROVAÇÃO DO CLIENTE:		FMEA Nº		1								
PROJETO	CLIENTE/PROJETO:	SENsoRES DISTRIBUÍDOS RAMAN A FIBRA ÓPTICA PARA MONITORAMENTO DE TEMPERATURA E GESTÃO DE ATIVOS NO SETOR DE O&G E ENERGIA				ETAPA:	PÁGINA:									
PROJETO: SDT-R para medição de temperatura em poços de petróleo	EQUIPE:					DATA 1ª EMISSÃO	16/12/2020									
RESPONSÁVEL PROJETOMANUFATURA:						DATA REVISÃO:	13/03/2025									
ITEM/NOME/FUNÇÃO DO PROJETO/PROCESSO	MODO DE FALHA POTENCIAL	EFEITO (S) DA FALHA EM PODENCIAL	SEVERIDADE	CAUSA (S) POTENCIAL DA FALHA	OCCORRÊNCIA	CONTROLE ATUAL DE PREVENÇÃO	CONTROLE ATUAL DE DETECÇÃO	DETECÇÃO	RISCO (RPN)	AÇÃO PREVENTIVA RECOMENDADA	NOME DO RESPONSÁVEL E PRAZO	AÇÃO TOMADA	SEVERIDADE	OCCORRÊNCIA	DETECÇÃO	RISCO (RPN)
<b>OTDR</b>	Saturação do fotodiodo interno Não emissão ou baixa potência do pulso de luz pelo diodo emissor laser Falha de detecção no fotodiodo	Não caracterização dos sinais retroespalhados nessa seção de fibra / Seção morto de OTDR Não aumento dos sinais retroespalhados	8 7 8	Reflexão de alta intensidade (Reflexão de Fresnel) Degradação gradual da potência do laser de saída ao passar ao tempo / Falha de calibração Umidade	4 3 6	Adicionar um comprimento de fibra no início do sensor óptico (Componentes a Zona Morta) Ensaio de laboratório Empacotamento hermético para evitar umidade	Deteção pelo operador durante o resultado ao log de temperatura Deteção pelo operador durante o resultado do log de temperatura Deteção pelo operador durante o resultado do log de temperatura	3 3 3	72 63 144	Evitar atenuação excessiva nos conectores e emendas da fibra óptica Tratado de acalibração e contornáveis OTDR com proteção IP67 ou superior			0 0 0			
<b>AMPLIFICADOR (EDFA)</b>	Falta de bombeio não suficiente para amplificação	Não aumento dos sinais retroespalhados raman Stokes e anti-Stokes	8	Dependência gradual da fonte de bombeio	3	Manutenção preventiva do amplificador	Deteção pelo operador durante o resultado do log de temperatura	2	36	Previsão do amplificador contra poeira e umidade			0			
<b>FIBRA ÓPTICA</b>	Quebra da fibra óptica Difusão de Hidrogênio (Escurecimento) Perda da integridade do revestimento da fibra	Interupção da medição / Falha do sensor Aumento da atenuação do sinal devido a alta inversão (Escurecimento) Espalho do núcleo da fibra ao meio externo	10 9 9	Esforços mecânicos acima do limite de flexão aplicado para a temperatura de operação; Fadiga devido a entortaduras e raios de curvatura acima do padrão da fibra. Difusão de hidrogênio na fibra óptica Altas temperaturas, exposição a luz ultravioleta, imersão em água ou fluido	10 9 5	Manter o raio de curvatura da fibra e 230 de curvatura inferior ao limite mínimo permitido pelo fabricante ou obtido por teste. Cuidado no manuseio durante o cabotamento e inspeção do raio máximo de curvatura. Design de revestimento da fibra óptica para proteção contra danos mecânicos e exposição a difusão de hidrogênio Drogar e escobrar de revestimento que previnam o estragamento, quebra, durar, durante a instalação da fibra. Escolher de cores de fibra. Escolher de cores de fibra.	Monitoramento da velocidade de Remanente (ROV) / Deteção pelo operador durante o resultado do log de temperatura Análise química do fluido de produção para estimar a concentração de hidrogênio no poço Deteção pelo operador por anomalias no resultado do log de temperatura	5 3 5	450 308 228	Evitar raios de curvatura sinuosa durante a instalação Estudos e Projetos apropriados para o nível de exposição ao hidrogênio. Projeto bem elaborado			0 0 0			
<b>PROTEÇÃO FIMT / TEF</b>	Empacotamento do cabeçote de projeto incorreto das partes mecânicas	Estrangulamento da fibra óptica ao ambiente de poço.	9	Impropriedade	3	Utilização de liga de aço super duplex	Monitoramento via Remanente (ROV)	4	108	Seguir as recomendações da AVES RP 3382			0			
<b>FUNÇÃO: PROTEGER A FIBRA ÓPTICA DO MEIO EXTERNO</b>		Perda de conexão. Exposição da fibra óptica ao ambiente de poço.	9	Altas temperaturas, exposição a luz ultravioleta, imersão em água ou fluido	5	Utilização de liga de aço super duplex	Monitoramento via Remanente (ROV)	4	180	Seguir as recomendações da AVES RP 3382			0			

FMEA - ANÁLISE DOS MODOS DE FALHAS E SEUS EFEITOS										FMEA Nº	1					
FMEA: PROJETO/PROCESSO		ÁREAS ENVOLVIDAS:		APROVAÇÃO DO CLIENTE:		ETAPA:		PÁGINA:								
PROJETO	CLIENTE/PROJETO:															
PROCESSO/PRODUTO:	SENSORES DISTRIBUIDOS RAMAN A FIBRA ÓPTICA PARA MONITORAMENTO DE TEMPERATURA E GESTÃO DE ATIVOS NO SETOR DE O&G E ENERGIA															
DTs-4 para medição de temperatura em poços de petróleo	EQUIPE:															
RESPONSÁVEL PROJETO/MANUFATURA:	DATA REVISÃO:															
	13/03/2025															
	DATA 1ª EMISSÃO															
	16/12/2020															
	AÇÃO TOMADA															
	SEVERIDADE															
	OCORRÊNCIA															
	DETECÇÃO															
	RISCO (RPN)															
ITEM/NOME/FUNÇÃO DO PROJETO/ PROCESSO	MODO DE FALHA POTENCIAL	EFETO (S) DA FALHA EM PODENCIAL	SEVERIDADE	CAUSA (S) POTENCIAL DA FALHA	OCORRÊNCIA	CONTROLE ATUAL DE PREVENÇÃO	CONTROLE ATUAL DE DETECÇÃO	DETECÇÃO	RISCO (RPN)	AÇÃO PREVENTIVA RECOMENDADA	NOME DO RESPONSÁVEL E PRAZO	AÇÃO TOMADA	SEVERIDADE	OCORRÊNCIA	DETECÇÃO	RISCO (RPN)
CIRCULADOR ÓPTICO	Atenuação acima do previsto (>1dB)	Ruído na medição/transmissão	4	Mau acoplamento (fusão) da fibra óptica com o circulador	5	Limpar e ajustar corretamente a fibra para fusão	Verificação de atenuação do acoplamento	1	20	Proteção contra umidade e poeira						0
FUNÇÃO: DIRECIONAM A PROPAGAÇÃO DA LUZ E FUNCIONAM COMO ISOLADORES NO SENTIDO CONTRÁRIO DE PROPAGAÇÃO																
CONNECTORES	Atenuação acima do previsto (>1dB) Desalinhamento da fibra óptica dentro do conector e mal contato entre as extremidades da fibra	Ruídos na medição/transmissão (Reflexão de Fresnel) Aumento da Atenuação	4	Contaminantes no acoplamento do conector (poeira, óleo, sujeira, etc) Degradação do conector (movimento da fibra óptica no seu interior) pelos ciclos de temperatura e umidade...	5	Limpar dos conectores com álcool isopropílico Conector não submetido a ciclos de temperatura e umidade	Verificação da atenuação do conector Verificação da atenuação do conector	1	20	Proteção contra umidade e poeira Proteção contra umidade e poeira						0
FUNÇÃO: PROVEM A CONEXÃO ENTRE OS COMPONENTES DO SISTEMA SENSOR																
FILTRO ÓTICO	Falha na separação das bandas Stokes / anti Stokes	Impossibilidade de medição	8	Falha no WDM (Wavelength- division Multiplex)	2	Empacotamento hermético para evitar umidade	Verificação pelo operador	2	32	Proteção contra umidade e poeira						0
FUNÇÃO: RESPONSÁVEL POR SEPARAR OS SINAIS STOKES E ANTI-STOKES E ENVIA-LO DE VOLTIA PARA O OTDR																