

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA CELSO SUCKOW DA
FONSECA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA - DEMEC
ENGENHARIA MECÂNICA**

MARINA PAIS FERREIRA PINTO

MÉTODOS DE ANÁLISE DE ALAGAMENTO NO ANULAR DE DUTOS FLEXÍVEIS

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**Rio de Janeiro
2025**

MARINA PAIS FERREIRA PINTO

MÉTODOS DE ANÁLISE DE ALAGAMENTO NO ANULAR DE DUTOS FLEXÍVEIS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica, do Departamento de Engenharia Mecânica, do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca.

Orientador: Jonatas Motta Quirino

**Rio de Janeiro
2025**

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central do CEFET/RJ

P659 Pinto, Marina Pais Ferreira
Métodos de análise de alagamento no anular de dutos flexíveis / Marina Pais
Ferreira Pinto – 2025.
73f. : il.color. ; enc.

Projeto Final (Graduação). Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da
Fonseca, 2025.

Bibliografia: f. 70-73.

Orientador: Jonatas Motta Quirino.

1. Engenharia mecânica. 2. Dutos flexíveis. 3. Tensões residuais.
4. Materiais – Fadiga. I. Quirino, Jonatas Motta. (Orient.). II. Título.

CDD 620.1

AGRADECIMENTOS

À minha família, por me dar todo o amor e suporte necessários para concluir essa etapa.

Resumo

PINTO, Marina. MÉTODOS DE ANÁLISE DE ALAGAMENTO NO ANULAR DE DUTOS FLEXÍVEIS. 2024.

Trabalho de Conclusão de Curso – Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca. Rio de Janeiro, 2025.

Os dutos flexíveis são uma solução para a exploração de petróleo em águas profundas dada a sua capacidade de operar em condições extremas. No entanto, esses dutos enfrentam diversos desafios para manter a sua integridade estrutural, sendo um dos principais o alagamento do anular, fenômeno que reduz a vida útil programada dos risers. A inspeção regular é essencial para garantir a integridade desses dutos e prolongar sua vida segura. Este trabalho visa realizar uma análise comparativa de técnicas emergentes de inspeção de alagamento no anular de risers flexíveis.

Palavras-chave: Dutos flexíveis. Alagamento do anular. Inspeção. Vida útil programada.

ABSTRACT

Pinto, Marina. **ANALYSIS METHODS OF ANNULAR FLOODING IN FLEXIBLE RISERS**. 2025. Final graduation project - Federal Center of Technological Education – Rio de Janeiro. 2025.

Flexible pipes are a solution for oil exploration in deep waters due to their ability to operate under extreme conditions. However, these pipes face several challenges in maintaining their structural integrity, with one of the main issues being annular flooding, a phenomenon that reduces the planned service life of risers. Regular inspection is essential to ensure the integrity of these pipes and extend their safe lifespan. This study aims to conduct a comparative analysis of emerging techniques for inspecting annular flooding in flexible risers.

Keywords: Flexible pipes. Annular flooding. Inspection. Planned service life.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Influencia da condição do anular na vida útil em fadiga [30]	14
Figura 2: Representação nos cenários de postergação e antecipação do descomissionamento [30].....	14
Figura 3: Esquema utilizando risers e flowlines. [22].....	17
Figura 4: Camadas típicas de um duto flexível [22].....	18
Figura 5: Perfil típico da carcaça intertravada [17]	19
Figura 6: Permeação de gases para o anular da estrutura [8]	20
Figura 7: Perfil Zeta [23].....	20
Figura 8: Perfil C [23]	20
Figura 9: Perfil teta [23]	21
Figura 10: Percentual de falhas e incidentes em tubos flexíveis. [21] (modificado) ..	24
Figura 11: Estágios do desenvolvimento da CST [4].....	26
Figura 12: Exemplo de arames corroídos de risers alagados retirados de operação [18]	26
Figura 13: Corrosão nos arames de tração de riser alagado retirado de operação [20]	27
Figura 14: Sensores óticos em Vermelho [14].....	33
Figura 15: Visualização dos dados de monitoramento do riser na sala de controle ..	36
Figura 16: Teste do Sistema DTS para Alagamento a 0.5 L/min [14] (modificado)...	37
Figura 17: Força do evento (event strenght)	39
Figura 18: Valores da frequência de ressonância em função da distância quando exposto em meio ao ar e a água. [26]	43
Figura 19: Dispositivo RFID com seus componentes [8]	44
Figura 20: circuito elétrico do dispositivo leitor/sensor	45
Figura 21: Teste em média escala em um corpo de prova [8] (modificado)	47
Figura 22: Resultado experimental do anular na condição seco [8]	48
Figura 23: Resultado experimental do anular na condição alagado [8].....	48
Figura 24: Análise da frequência e do parâmetro S11 em função do tempo [8].....	49
Figura 25: Comportamento da frequência de ressonância em função do tempo [8] .	50
Figura 26: Sistema de inspeção de raios gama [9] (modificado).....	53
Figura 27: Feixe de radiação atenuado por um material não homogêneo de n camadas de espessuras e coeficientes de atenuação diferentes. [10]	55
Figura 28: Detalhes do dispositivo de detecção por radiação gama [9] (modificado)	56
Figura 29: Esquemático do dispositivo de radiação gama acoplado ao ROV [9]	57
Figura 30: Perfil das densidades para a amostra preenchida com cada conteúdo. [10]	58
Figura 32: Variação do nível de água dentro do riser... Erro! Indicador não definido.	

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Resultados do teste de perfil de rotação	58
--	----

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Comparação entre tecnologias de inspeção	65
Quadro 2: Comparação entre os custos.....	66

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 OBJETIVOS.....	16
2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS	17
2.1 DUTOS FLEXÍVEIS	17
2.1.1 Carcaça interna.....	19
2.1.2 Revestimento interno	19
2.1.3 Armadura de pressão	20
2.1.4 Armadura de tração	21
2.1.5 Capa Externa (ou revestimento externo)	21
2.2 MODOS DE FALHAS EM DUTOS FLEXÍVEIS.....	23
2.2.1 Alagamento do anular.....	25
2.2.2 Métodos de inspeção de alagamento em anular	27
3 ESTUDO COMPARATIVO ENTRE PRINCIPAIS TÉCNICAS DE INSPEÇÃO....	31
3.1 DTS (SENSOR DE DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURA).....	33
3.2 RADIOFREQUÊNCIA (RFID)	42
3.3 RAIOS GAMA	53
3.4 RESULTADOS COMPARATIVOS.....	64
4 CONCLUSÃO.....	68
5 PERSPECTIVAS FUTURAS	69
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	70

1 INTRODUÇÃO

O mercado de óleo e gás vem crescendo significativamente, sendo crucial para a economia global. No Brasil, as vastas reservas posicionam o país como um dos principais produtores de petróleo e gás natural no cenário internacional. Com o desenvolvimento da exploração offshore, especialmente em águas profundas, a necessidade de sistemas de transporte que pudessem suportar movimentos e tensões tornou-se evidente.

Os dutos flexíveis, conhecidos como risers, emergiram como uma solução inovadora, proporcionando flexibilidade, facilidade de instalação e resistência a condições operacionais adversas. Seu desenvolvimento e aprimoramento contínuo são essenciais para atender as demandas cada vez maiores e mais desafiadoras de exploração.

Entretanto, esses dutos enfrentam desafios relacionados à integridade e durabilidade, devido à exposição a alta pressão, temperaturas extremas, corrosão e risco de alagamento. Esses problemas exigem atenção especial, visto que os projetos na indústria do petróleo são desenvolvidos para operar de maneira economicamente viável ao longo de décadas.

A presença de água no anular dos dutos, por exemplo, agrava o processo de corrosão sob tensão ao se juntar a gases advindos do petróleo, criando um ambiente altamente corrosivo para as camadas metálicas. Quando ocorre a sinergia entre a presença de um processo corrosivo e de cargas cíclicas, causadas pelo peso do riser, pela movimentação de ondas e correntes marinhas, trincas podem se propagar nas armaduras de tração e levar até a ruptura do duto [1].

A condição alagado ou não alagado do duto influencia na curva S-N a ser aplicada na determinação da vida útil em fadiga do riser [2]. A Figura 1 exemplifica três curvas S-N para cada condição do anular do duto flexível.

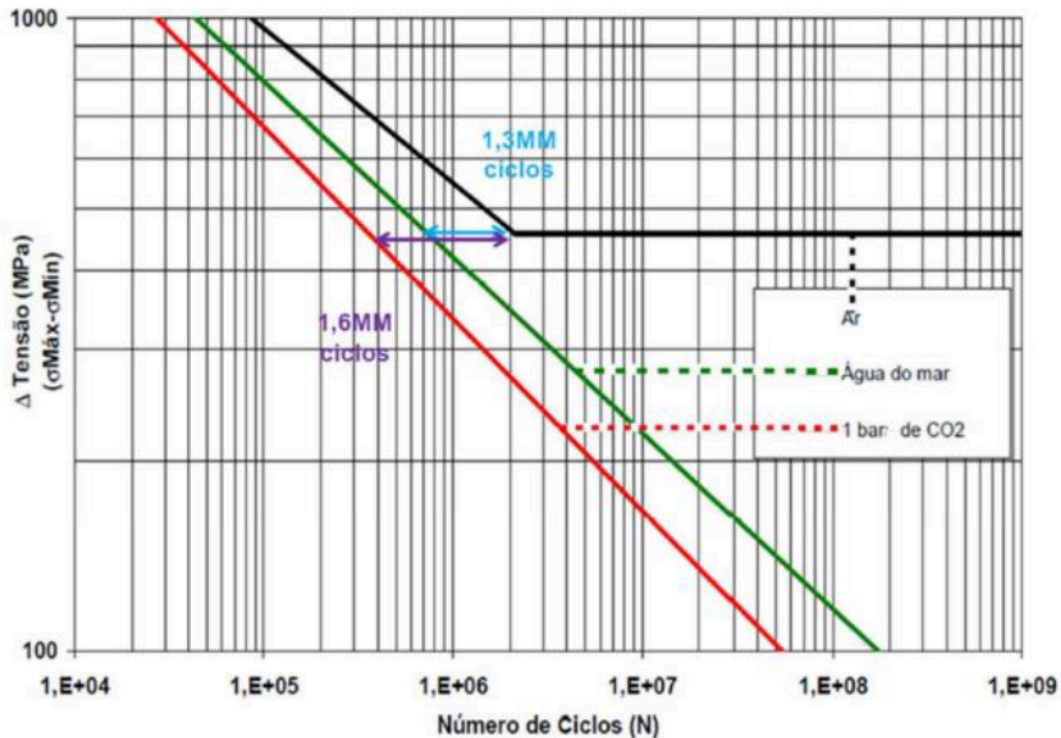


Figura 1: Influencia da condição do anular na vida útil em fadiga [2]

A Figura 1 mostra a tensão máxima (eixo y) e a quantidade de ciclos (eixo x) a qual cada condição do duto suporta. Pode-se observar que quando mais severo é o ambiente, mais à esquerda está a curva e menor é o seu número de ciclos máximo. Ou seja, ao comparar a curva preta com a curva verde, fica evidente que o anular alagado vai ter um número de ciclos reduzido, chegando mais cedo à falha.

Assim, o alagamento do anular pode impactar na vida útil programada do riser, aumentando o risco de falhas catastróficas e gerando grandes impactos econômicos se não for detectado com antecedência. A Figura 2 representa, de forma simplificada, o impacto da postergação ou antecipação do descomissionamento de um duto submarino sobre o retorno econômico.

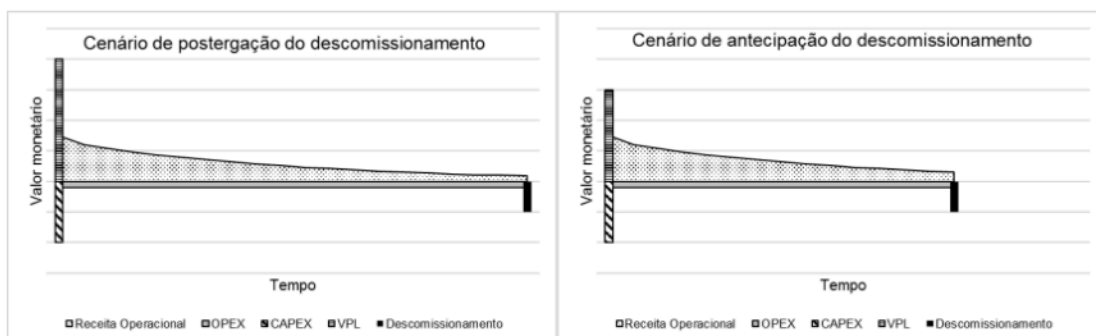


Figura 2: Representação nos cenários de postergação e antecipação do descomissionamento [2]

Na Figura 2, o eixo x é o tempo de operação do riser e o eixo y é o valor monetário relativo à sua compra. Nota-se que, quanto maior o tempo de produção, maior é o retorno econômico, pois o seu custo será diluído ao longo de um período maior. De forma inversa, a necessidade de antecipação do descomissionamento gera um grande impacto nos custos da operação, uma vez que terá o mesmo valor de compra para operar por menos tempo.

Dado o grande investimento econômico de um projeto de exploração, as indústrias de petróleo precisam operar com um custo de extração mais baixo possível e esse custo é sensivelmente influenciado pelo tempo de vida útil dos dutos flexíveis [2].

As técnicas de inspeção surgiram a partir da necessidade da engenharia submarina de prever e monitorar falhas de dutos flexíveis em operação. As informações coletadas são importantes para subsidiar a tomada de decisão em ocorrências que estejam fora dos requisitos do projeto.

A coleta dos dados de inspeção tem como objetivos [2]:

- Detectar antecipadamente a degradação estrutural de forma tal que se possa tomar ações de correção antecipadas e precisas, sem prejuízos de produção, evitando acidentes e/ou perdas de vida, danos ambientais, prejuízos econômicos e paradas operacionais não previstas;
- Coletar dados sobre os mecanismos de falha e a forma com que evoluem nas mais diversas condições, o que permite desenvolver novos materiais e novos processos de fabricação;
- Previsibilidade de técnicas de inspeção e manutenção do equipamento mais acuradas e focadas no dano gerado.

Este trabalho propõe estudar métodos emergentes de inspeção que permitam detectar a presença de alagamento no anular.

1.1 OBJETIVOS

Em 2022, 92% da produção total da Petrobras no Brasil aconteceu em águas profundas ou ultra profundas [3]. Com o aumento da demanda por produtos derivados de petróleo e gás, novas tecnologias associadas aos dutos flexíveis se fazem fundamentais para superar os desafios da indústria de exploração e produção de óleo.

Para garantir a segurança da operação, dos trabalhadores envolvidos e do ambiente ao redor, adota-se uma abordagem conservadora para compensar a falta de informações sobre o estado do riser. Além disso, a falta de informação sobre a condição real do duto pode levar a propagação de falhas silenciosas, resultando em uma redução significativa na sua vida útil. Como consequência, muitas vezes é necessário antecipar o descomissionamento, gerando um grande impacto nos custos operacionais.

A maneira mais eficaz de mitigar essa situação é através da aplicação de técnicas de inspeção que fornecem informações atualizadas sobre a integridade dos dutos flexíveis. O objetivo primordial dessas técnicas é detectar, o quanto antes, os mecanismos que levam às falhas, antevendo o avanço dos mesmos e gerando mais segurança operacional e economia nas operações petrolíferas.

Este trabalho tem como objetivo comparar as diferentes técnicas de inspeção do anular emergentes, por meio das métricas de maturidade tecnológica, com base no critério TRL (Technology Readiness Level), confiabilidade, avaliando a precisão dos dados coletados, se é aplicável para monitoramento contínuo ou apenas para inspeções pontuais, intrusividade, analisando quais técnicas podem ser adaptadas a risers já em operação, capacidade de localização do alagamento e, por último, os custos associados a cada uma, avaliando a necessidade de modificações no riser, custos com o sistema e necessidade de utilizar equipamentos auxiliares, como o ROV (Remote Operated Vehicle).

Como são tecnologias relativamente novas no mercado, cada uma apresenta vantagens e limitações específicas, além de oferecer um grande potencial para aprimoramentos futuros.

2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 DUTOS FLEXÍVEIS

Dutos flexíveis são tubulações compostas por múltiplas camadas que conferem a eles alta flexibilidade. Sendo muito utilizados em sistemas de produção flutuante, como as plataformas semi-submersíveis e os FPSO's (Floating Production Storage and Offloading), o mercado de dutos flexíveis cresceu rapidamente devido à sua capacidade de resistir a movimentos dinâmicos, como as correntes oceânicas, mantendo sua integridade estrutural. Hoje em dia os risers são utilizados em quase todos os campos de produção de petróleo brasileiro em águas profundas [4].

Dependendo da aplicação, os dutos recebem um nome específico, mas a sua estrutura é basicamente a mesma. O duto utilizado no trecho que conecta a plataforma aos terminais submarinos é chamado de riser. Os risers possuem vários tramos conectados entre si, e a estrutura com todos eles forma uma catenária. Já a seção que interliga os poços aos terminais submarinos, como os manifolds, é denominada flowline. Essa diferenciação pode ser vista na Figura 3.

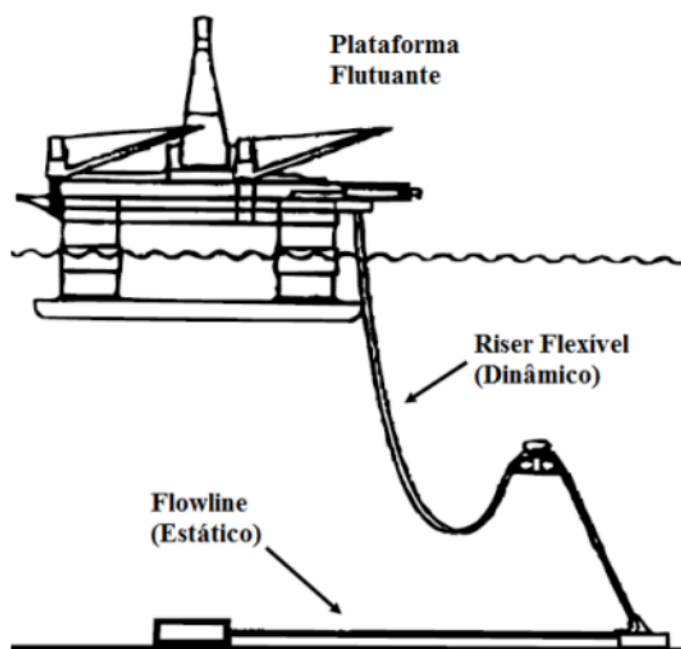


Figura 3: Esquema utilizando risers e flowlines. [4]

A região do anular consiste no espaço radial que vai do diâmetro externo da camada de pressão ao diâmetro interno de uma camada estanque subsequente, conforme representado pela Figura 4. Os tramos de dutos flexíveis são compostos pelo corpo tubular, que é o duto flexível, e dois conectores chamados end-fittings, e são conectados entre si por terminações flangeadas denominadas conectores.

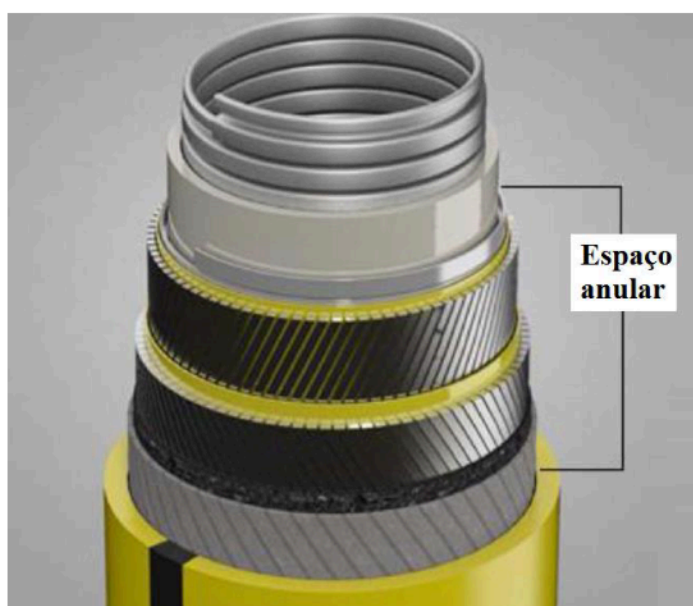


Figura 4: Espaço anular [21]

Cada camada do duto flexível desempenha uma função e é essencial para a integridade da linha como um todo. A Figura 5 representa um corte do anular do duto flexível, com suas camadas nomeadas.

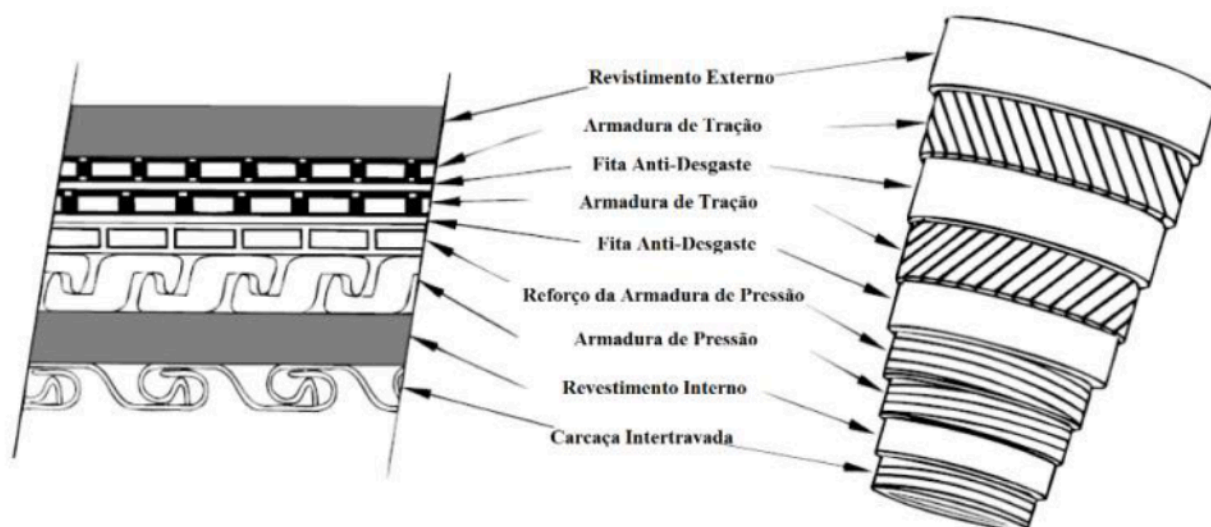


Figura 5: Camadas típicas de um duto flexível [4]

Suas principais camadas e respectivas funções estão descritas abaixo.

2.1.1 Carcaça interna

A carcaça interna é formada por uma fita metálica de aço inoxidável, enrolada em hélice e intertravada, representada na Figura 6, capaz de resistir ao colapso mesmo quando o duto se encontra curvado. Como a carcaça fica em contato direto com o fluido, os materiais mais utilizados para esta camada são os aços inoxidáveis, como AISI 304, AISI 304L ou AISI 316L [5].



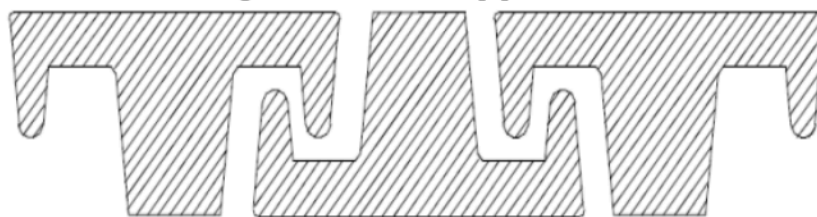
Figura 6: Perfil típico da carcaça intertravada [5]

Sua principal função é evitar o colapso da estrutura devido à pressão hidrostática ou expansão do gás permeado para o anular da linha numa eventual despressurização do duto.

2.1.2 Revestimento interno

O revestimento interno, ou barreira de pressão, consiste em um material termoplástico extrudado sobre a carcaça interna. Pode ser fabricada com diferentes materiais poliméricos, de acordo com os parâmetros operacionais do duto, tais como temperatura, teor de contaminantes e pH.

Sua principal função é garantir a estanqueidade interna do duto. Porém, a barreira de pressão é permeável, logo, apesar da capacidade de conter o fluido interno, pequenas moléculas de hidrocarbonetos, como H₂S, CO₂ e H₂O, podem migrar para o anular, entrando em contato com os materiais da armadura de pressão e tração [6]. Essa interação pode afetar a resistência à fadiga das camadas metálicas devido a processos corrosivos. A Figura 7 ilustra o processo de permeação dos gases.

Figura 10: Perfil teta [7]

Tem como principais funções suportar a pressão interna exercida pelo fluido transportado e resistir a esforços radiais causados pela armadura de tração.

2.1.4 Armadura de tração

A armadura de tração é composta por arames metálicos aplicados helicoidalmente ao longo de todo o comprimento do duto, com os ângulos de hélices podendo variar de 20 a 60 graus dependendo da aplicação do duto. O ângulo de hélice está estritamente ligado com a capacidade do duto de resistir à tração. Quanto maior for o ângulo, maior será a resistência a pressão interna e, de maneira oposta, quanto menor for o ângulo maior será a resistência à tração [8].

Durante um esforço axial, a tendência da armadura é torcer, devido à disposição helicoidal dos arames. Para evitar que este fato comprometa o funcionamento das demais camadas do duto, a segunda armadura possui um ângulo de hélice oposto ao primeiro.

O material utilizado na fabricação dos arames da armadura de tração pode ser o aço carbono ou aço liga, com resistência mecânica de 1400 MPa devido ao possível ambiente corrosivo presente no anular do duto flexível. Fitas adesivas são aplicadas sobre as armaduras de tração durante a fabricação do duto flexível para evitar o desalinhamento dos arames.

Assim, a armadura de tração tem como principal função resistir às cargas axiais de tração.

2.1.5 Capa Externa (ou revestimento externo)

A camada de proteção externa, também conhecida como capa externa, é fabricada com material plástico extrudado logo após as fitas utilizadas para manter os arames da armadura de tração alinhados.

Sua principal função é vedar a entrada de água e outros materiais presentes no ambiente marinho, como areia, mantendo a integridade das camadas internas.

Normalmente, esta camada não se mantém íntegra por toda a vida de um duto, principalmente quando o campo petrolífero se encontra em ambiente marinho com presença de corais ou outros elementos capazes de danificar a capa polimérica do duto. Assim, danos na capa externa são umas das principais causas de falha de dutos flexíveis, uma vez que a entrada de água do mar leva à aceleração de processos corrosivos que levam à deterioração das camadas metálicas internas.

2.2 MODOS DE FALHAS EM DUTOS FLEXÍVEIS

Os dutos flexíveis são amplamente utilizados na indústria de óleo e gás devido à sua versatilidade e capacidade de suportar movimentos dinâmicos. No entanto, esses dutos estão sujeitos a diversas condições operacionais desafiadoras que podem levar a diferentes modos de falha.

A norma API RP 17B (2014) apresenta os principais defeitos e mecanismos de falhas para cada camada dos dutos flexíveis, indicando suas possíveis causas. As falhas a seguir são listadas pela norma devido à sua recorrência e suas consequências críticas:

- Colapso
- Explosão
- Falha em Tração
- Falha em Compressão
- Curvatura Excessiva
- Falha por Torção
- Falha por Fadiga
- Erosão
- Corrosão

Colapso e explosão são falhas catastróficas que ocorrem devido a pressões internas ou externas excessivas.

As falhas em tração e compressão ocorrem quando as forças longitudinais excedem a capacidade do duto de resistir a essas cargas.

Curvatura excessiva e falha por torção são causadas por movimentos dinâmicos que excedem os limites de flexibilidade do duto.

A falha por fadiga ocorre devido à repetição de ciclos de carga, levando à formação de microfissuras que se propagam ao longo do tempo.

A erosão é causada pelo fluxo de fluidos abrasivos que desgastam a superfície interna do duto. Já a corrosão resulta da reação química entre o material do duto e o ambiente circundante, como água do mar.

A corrosão sob tensão é um fenômeno onde a tensão mecânica e ambiente corrosivo ocorrem em sinergia, resultando em trincas que podem se propagar rapidamente, levando à falha do duto.

Esses modos de falha são acelerados pelas condições do ambiente submarino, como variações de temperatura, pressão e esforços mecânicos. A norma API RP 17B (2014) enfatiza a importância de um monitoramento contínuo, evitando que a degradação progrida de forma silenciosa até que ocorram falhas catastróficas.

A Figura 11, apresentada no *Jornal de Tecnologias do Petróleo* (*Journal of Petroleum Technology*), mostra as principais falhas e sua incidência, evidenciando a grande proporção de falhas na barreira de vedação externa e subsequente alagamento do anular. Esse fato impulsionou o investimento das grandes produtoras em pesquisa e desenvolvimento de tecnologias para mitigar o problema.

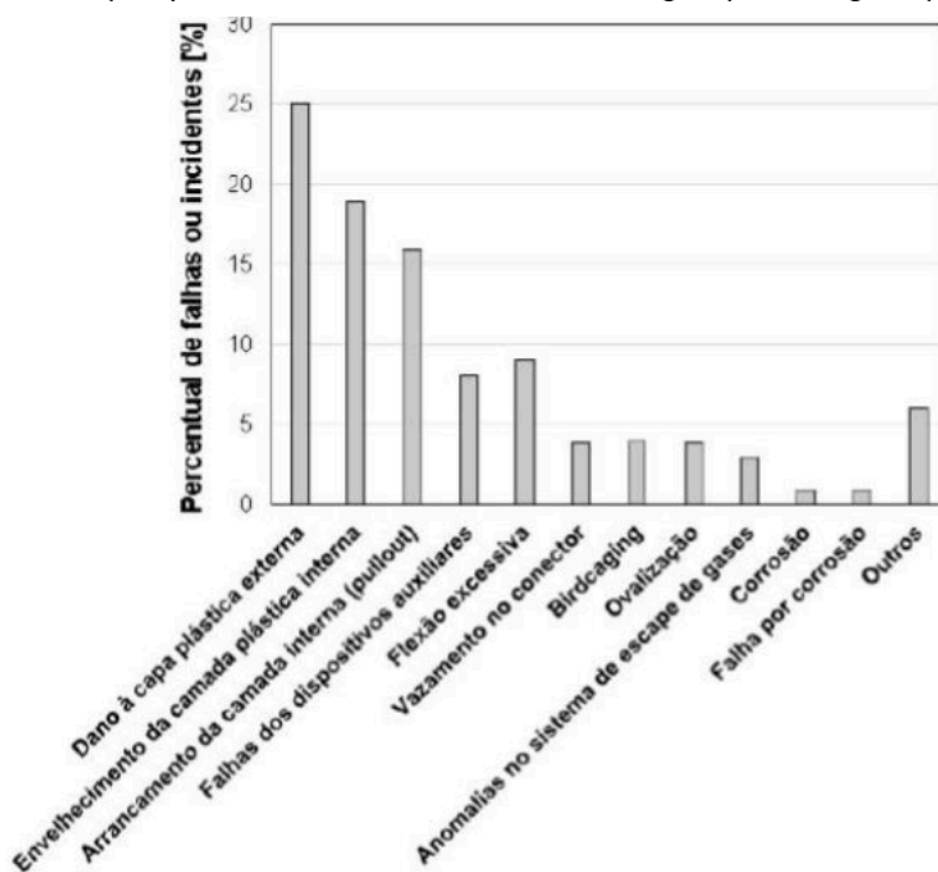


Figura 11: Percentual de falhas e incidentes em tubos flexíveis. [8]

Nesse contexto, as tecnologias de monitoramento são uma ferramenta poderosa para a detecção precoce de anomalias no anular, como os casos de alagamento. O monitoramento permite que ações corretivas sejam planejadas, minimizando custos operacionais e garantindo maior confiabilidade e segurança do sistema. Ao avaliar a condição dos risers em tempo real, sua vida pode ser prolongada, assegurando sua integridade estrutural e operacional por mais tempo.

2.2.1 Alagamento do anular

O petróleo conduzido pelo duto é composto por uma mistura bifásica de líquido e gases. Certos componentes, como CO₂, H₂S e CH₄, permeiam através da barreira de pressão polimérica, chegando até o espaço anular do duto.

A capa externa, projetada para proteger as camadas internas do duto contra abrasão, impactos e agressões do ambiente submarino, pode sofrer danos mecânicos durante a instalação, operação ou devido ao contato com corpos flutuantes e objetos no leito marinho.

Quando essa proteção é comprometida a água marinha pode se infiltrar, alagando o espaço anular e expondo os componentes metálicos internos. A combinação da água com os gases mencionados torna o anular um ambiente agressivo, podendo induzir um processo corrosivo nas armaduras de tração e pressão.

O fenômeno de corrosão sob tensão – CST (Stress Corrosion Cracking – SCC em inglês) é um tipo de falha em serviço que ocorre pela lenta propagação de trincas. A propagação da trinca é induzida pela combinação de tensões mecânicas, que são os esforços mecânicos cíclicos, causados pelos movimentos dinâmicos das ondas e correntes marinhas, e os esforços axiais causados pelo peso do riser, junto com as reações corrosivas que ocorrem no ambiente do anular.

Os ambientes que levam a CST são geralmente aquosos e podem ser caracterizados por camadas de umidade condensada ou outras soluções. Outros fatores como a composição química, microestrutura, processo de fabricação e tratamento térmico sofrido pelo material influenciam na suscetibilidade de ligas metálicas à CST.

A sequência de eventos envolvida no processo de CST é normalmente dividida em 3 estágios. A iniciação das trincas e estágio de propagação 1 é o período no qual as primeiras trincas em escala microscópica aparecem. No estágio de propagação 2, a velocidade de propagação é constante. Por fim, chega o estágio de propagação 3, caracterizado pelo aumento da velocidade de propagação. Ao chegar ao valor crítico de propagação, a tenacidade do material será superada e ocorrerá uma ruptura final. A Figura 12 apresenta os estágios até a fratura catastrófica do material.

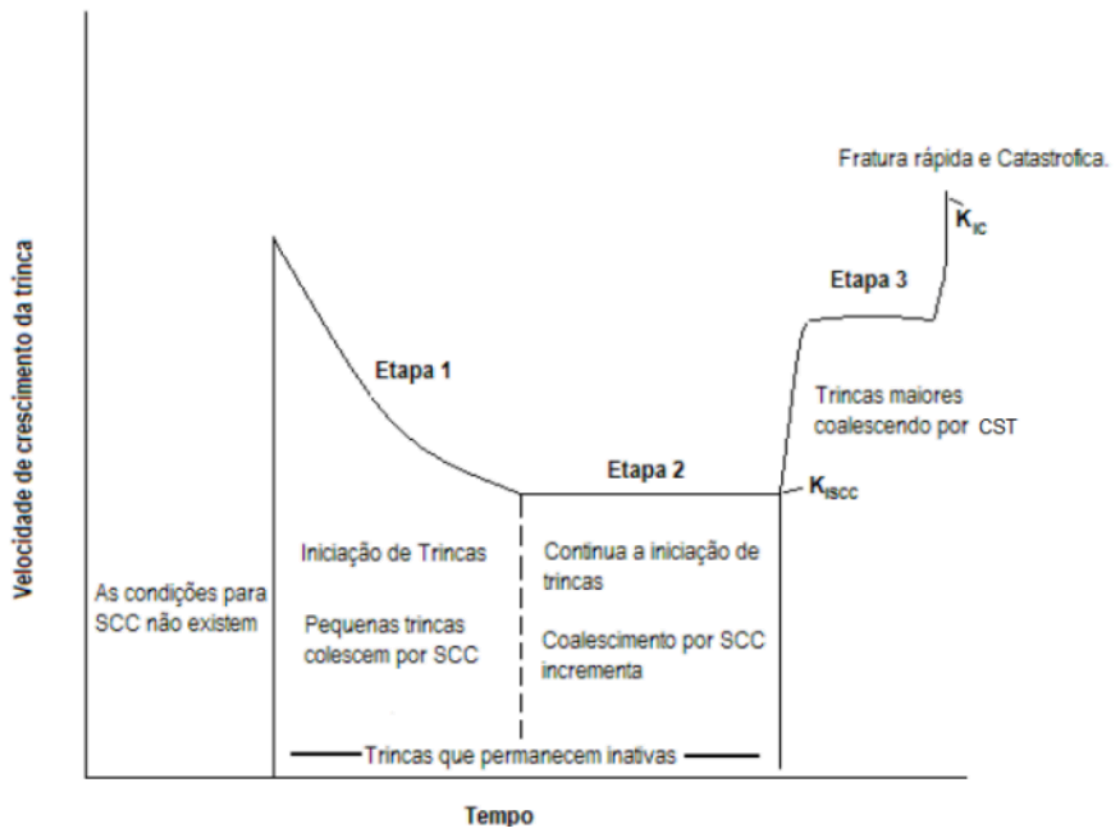


Figura 12: Estágios do desenvolvimento da CST [1]

A grande incidência do alagamento no anular dos risers e as graves consequências da combinação da água com os gases do produto transportado levaram à investigação de risers retirados de operação que apresentavam essas características.

Foram identificados pites de corrosão após a dissecação de dois diferentes dutos que operavam com anular alagado com profundidades de 65 a 250 μm [9]. A Figura 13 apresenta fotos das superfícies corroídas dos arames destes dois risers.

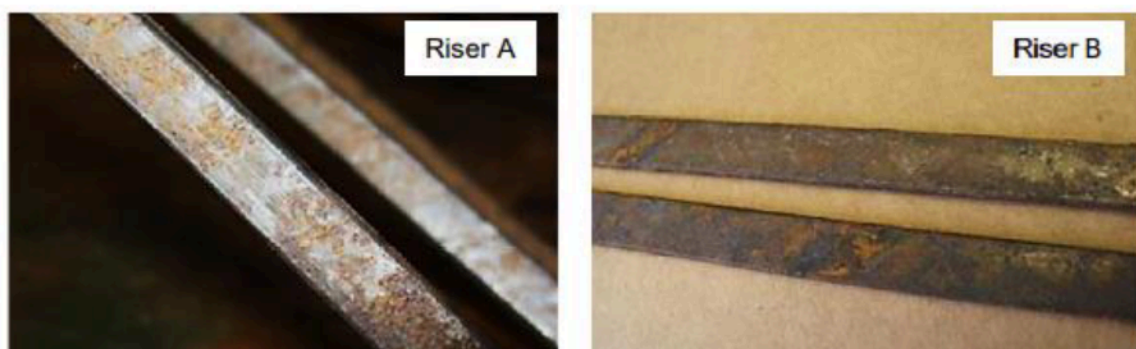


Figura 13: Exemplo de arames corroídos de risers alagados retirados de operação [9]

Outro exemplo ocorreu em 2014, quando registraram um processo corrosivo mais acentuado na região dos gaps da fita anti-atrito das armaduras de tração do riser retirado que campo que operava com anular alagado, conforme mostra a Figura 14 [10].



Figura 14: Corrosão nos arames de tração de riser alagado retirado de operação [10]

A Agência Nacional de Petróleo (ANP) emitiu o Alerta de Segurança 012 – ANP/SSM a respeito da corrosão sob tensão por CO₂, reforçando a gravidade desse modo de falha. Uma das lições para mitigar o problema está relacionado ao gerenciamento da integridade, aonde se mostrou necessário estabelecer um programa de gerenciamento de integridade para dutos com potencial de ocorrência do fenômeno, com o uso de ferramentas de inspeção de alagamento de dutos.

2.2.2 Métodos de inspeção de alagamento em anular

Considerando o cenário apresentado e a importância de manter os dutos flexíveis em operação de maneira segura o maior tempo possível, a inspeção dos dutos flexíveis vem se tornando cada vez mais um foco de atenção para o desenvolvimento de tecnologias eficazes. Técnicas para detectar os mecanismos de degradação, como a presença de água no anular, são essenciais para auxiliar no gerenciamento da integridade da linha.

A inspeção de alagamento no anular pode ser feita de forma a detectar a estanqueidade da camada externa ou detectar a presença de água no anular do duto. As principais técnicas de inspeção usadas para identificar alagamento no anular são apresentadas a seguir.

- Inspeção visual:

A inspeção visual é a técnica mais simples para avaliar a condição dos dutos flexíveis, ideal para verificar danos na capa externa dos dutos. Envolve uma análise visual direta da superfície externa do duto em busca de danos visíveis, como rachaduras, abrasões, ou desgaste excessivo. Essa inspeção pode ser feita com ROVs equipados com câmeras que vão percorrer a linha. Apesar de simples, sua eficácia é limitada, pois só detecta danos superficiais visíveis. Além disso, a necessidade de acessar o duto é uma limitação em profundidades maiores.

- Teste de pressão no anular:

É feita uma injeção de gás nitrogênio através das vent valvels, válvulas que se encontram no end-fitting de topo, para inspecionar a integridade interna e externa das camadas de vedação. A pressão no anular estabiliza, e os sensores monitoram suas variações. É uma forma eficiente de detectar falhas microscópicas na capa externa, mas não identifica pequenos vazamentos ou estágios iniciais de alagamento, além da sua aplicação estar limitada apenas aos risers de topo.

- Monitoramento do gás percolado:

É baseado no monitoramento de parâmetros como a pressão, vazão e composição dos gases permeados no interior da linha, através da captação do gás ventado pela válvula de alívio quando esta atinge a pressão máxima. Eficaz para detectar alagamento em estágios avançados, mas requer sensores especializados e não é capaz de identificar a localização do alagamento, podendo ser em qualquer ponto da extensão do riser.

- Teste por ultrassom:

Ondas sonoras são transmitidas através do duto e o sinal refletido é analisado para determinar a condição do anular [5]. Possui alta sensibilidade para alagamentos localizados, mas exige equipamentos sofisticados e técnicos treinados. Além disso, os resultados dependem da qualidade do acoplamento ultrassônico.

- Fibra ótica (DTS – Distributed Temperature Sensing):

A fibra ótica é instalada junto aos arames da armadura de tração e monitorada por um sistema de sensores para analisar os gradientes de temperatura ao longo do duto [11]. A técnica se baseia na propagação de pulsos de luz laser através das fibras óticas, e, ao viajarem pela fibra, a luz interage com as irregularidades moleculares do material da fibra, gerando um espalhamento ótico sensível a temperatura. A intensidade dos componentes gerados permite calcular a temperatura ao longo da fibra com precisão, por isso é altamente eficaz para a detecção precoce de alagamento. A fibra ótica, porém, precisa ser instalado durante a fabricação dos dutos, não sendo aplicável para dutos já instalados.

- Identificação por Radiofrequência (RFID):

Aplicação de uma matriz de sensores RFID ao longo do duto para monitoramento da variação de ressonância que ocorrerá em caso de alagamento [1]. O alagamento é identificado quando as ondas de rádio entram em contato com materiais com propriedades dielétricas diferentes, como a água, gerando alterações do sinal refletivo. Essa técnica pode ser aplicada para inspeção pontual, mas sua aplicação é restrita a áreas específicas dos dutos que possuam os sensores instalados.

- Raios Gama:

Essa técnica de inspeção é feita por meio da varredura com radiação gama para detectar alterações na densidade do anular causada pelo seu alagamento [6]. Quando o feixe de raios gama atravessam um meio, sua atenuação depende da densidade e da composição do material. A intensidade do feixe que atravessa o anular é registrada por detectores sensíveis, sendo possível identificar mudanças na densidade do anular causadas devido a presença de água. É altamente preciso para identificar alagamentos, mas necessita de equipamentos especializados devido ao uso de radiação ionizante.

Brevemente explicitados as técnicas acima, podemos inferir que técnicas como inspeção visual e testes de pressão são úteis para inspeções de rotina, mas têm eficácia limitada na detecção precoce do alagamento. Métodos mais avançados, como ultrassom, fibra ótica e raios gama, oferecem maior precisão, especialmente para monitoramento contínuo e detecção em estágios iniciais. No

entanto, essas técnicas geralmente requerem maior investimento inicial e mão de obra especializada. A escolha da abordagem ideal vai depender das condições operacionais, da criticidade do duto e do orçamento disponível.

3 ESTUDO COMPARATIVO ENTRE PRINCIPAIS TÉCNICAS DE INSPEÇÃO

Alguns métodos de inspeção já são consolidados no mercado de óleo e gás. A inspeção visual, por exemplo, pode ser feita com o auxílio de ROV's para verificar a presença de danos na capa externa, mas a sua detecção é limitada a danos aparentes. O teste de pressão no anular é uma técnica que pode ser usada para identificar alagamento, mas não é capaz de identificar sua localização ou seus estágios iniciais. Já o monitoramento do gás percolado é feito pelo riser de topo, sendo seu limitante o custo para o monitoramento.

O objetivo deste trabalho é traçar um estudo comparativo entre as técnicas de inspeção em desenvolvimento, e propor melhorias para uma inspeção mais confiável e eficaz. Nesta sessão, o estudo se aprofunda na especificidade de três técnicas, DTS, Radiofrequência e Raios Gama, para estabelecer um comparativo entre elas com base em seis critérios diferentes:

- I. **Maturidade Tecnológica:** criado pela NASA, o TRL (Technology Readiness Level) foi desenvolvido com o objetivo de avaliar o nível de maturidade de determinada tecnologia. Os níveis de maturidade são divididos em 9, sendo o TRL1 o mais baixo, referindo-se à pesquisa básica e desenvolvimento teórico da tecnologia, e o TRL 9 o mais alto, nível no qual a tecnologia está pronta para ser utilizada, após a prova de conceito e validação. Um TRL5, por exemplo, indica a validação da técnica de inspeção em um ambiente relevante, mas em estágios iniciais de testes e desenvolvimento do dispositivo, como é o caso do sistema RFID. O TRL6, por sua vez, é o nível de progresso da técnica de detecção por raios gama uma vez que o protótipo do sistema de inspeção foi qualificado em um ambiente relevante, mas ainda não foi testado em condições reais de operação. Já a técnica de DTS foi ranqueada como TRL8 após a qualificação desse sistema de inspeção completo por meio de testes e demonstrações em campo.
- II. **Confiabilidade:** diretamente relacionada com a capacidade do sistema em fornecer informações precisas, consistentes e úteis. Para avaliar os resultados de cada técnica nos testes de qualificação e/ou aplicação da

técnica em uma situação real de campo, utilizou-se como métricas a taxa de detecção de alagamento e a precisão dos resultados nos testes existentes.

- III. **Monitoramento Contínuo vs. Inspeção Pontual:** quais técnicas são aplicáveis para monitoramento contínuo, sendo necessário que o sistema fique instalado permanentemente, e quais técnicas podem ser usadas apenas para inspeção pontual.
- IV. **Intrusividade:** comparando a facilidade de adaptação de cada tecnologia ao cenário real de operação, especialmente se for necessário algum tipo de modificação nos risers.
- V. **Capacidade de Localização do Alagamento:** quais técnicas fornecem a profundidade do alagamento no anular. Essa informação é importante para identificar qual é o tramo que está alagado, uma vez que o alagamento pode ocorrer de forma independente em cada tramo da catenária.
- VI. **Custos e Viabilidade Econômica:** a estimativa vai considerar custos com equipamento e infraestrutura e custos para a operação, sendo esses os mais significativos para uma operação de inspeção de risers.

Ao final, será apresentada um quadro comparativo com os resultados aferidos para cada técnica.

3.1 DTS (SENSOR DE DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURA)

Os sistemas de monitoramento ótico fazem uso de uma fibra ótica para transportar pulsos de luz. Os pulsos refletidos ao longo da fibra retornam para um interrogador que mede as mudanças no comprimento de onda da luz refletida, convertendo-o para propriedades físicas, como temperatura ou deformação. A relação entre o comprimento de onda e essas propriedades físicas se dá pela variação do índice de refração da fibra ótica.

Sensores de fibra ótica são uma ótima opção para aplicações em águas profundas devido à sua imunidade a interferências eletromagnéticas, confiabilidade, longa vida útil e capacidade de transmissão de sinal a longas distâncias, além de sua natureza linear e não intrusiva quando incorporados em estruturas flexíveis de grande comprimento, como risers.

No sistema DTS utilizado para inspeção de dutos flexíveis, a fibra ótica é instalada no anular da estrutura junto aos arames da armadura de tração [12]. As fibras sensoras de temperatura são representadas em vermelho na Figura 15. Os fios azuis são sensores de deformação, cuja análise não faz parte do escopo deste trabalho.

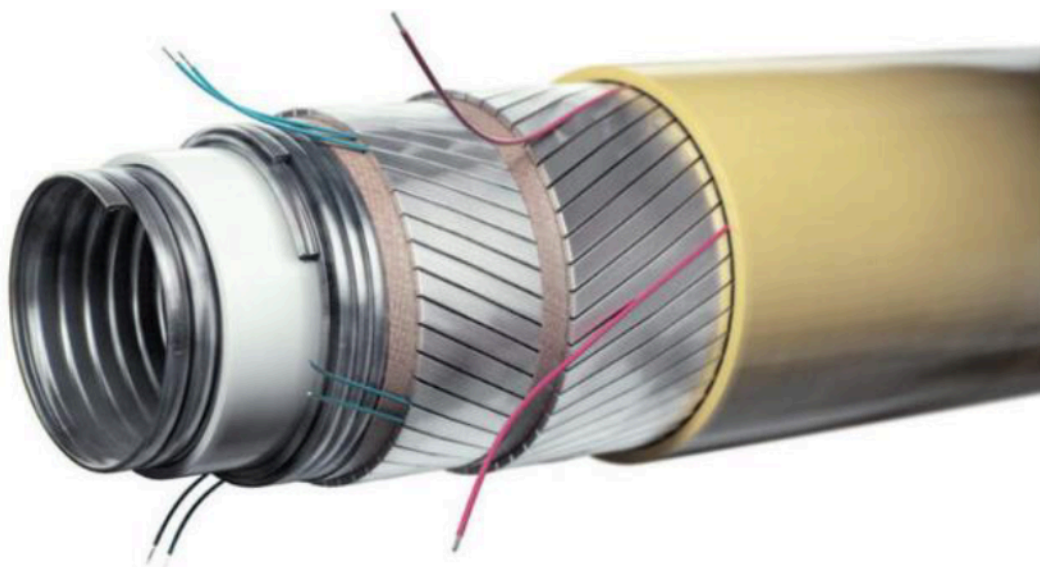


Figura 15: Sensores óticos em Vermelho [12]

O monitoramento da temperatura no anular pode ser realizado de duas formas: sensores baseados em redes de Bragg (FBG), que refletem luz em pontos

específicos ao longo da fibra, ou sistemas de espalhamento de Raman, que monitoram continuamente as variações de temperatura ao longo da fibra. Com base na leitura da temperatura do anular da linha, pode-se inferir se o anular está alagado, assim como calibrar os cálculos de permeação.

A diferença entre os dois sistemas está na forma em que os feixes de luz são refletidos.

No caso da rede de Bragg, filtros óticos são criados ao longo da fibra através da exposição desta à luz ultravioleta. O pulso de luz, ao passar por esses filtros, é parcialmente refletido, retornando com um comprimento de onda específico para cada sensor. Para este sistema, porém, avaliação de vários pontos com uma única fibra ótica é limitada a até 80 pontos, a depender da faixa de leitura do interrogador [13].

No caso do espalhamento de Raman, o feixe de luz é refletido ao longo de toda a fibra pela variação do índice de refração em função das mudanças de temperatura ou deformação. Este método, por sua vez, não possui limitação de pontos a serem avaliados, apenas uma limitação de resolução espacial [13].

O sistema DTS utiliza o princípio de espalhamento de Raman OTDR (Optical Time Domain Reflectometry), mais vantajoso para o monitoramento da condição do anular pois é capaz de medir a temperatura em longas extensões de fibra.

O sistema emite pulsos de luz laser em uma fibra e detecta a quantidade de energia de luz espalhada que retorna ao instrumento, lendo as variações no comprimento de onda e na intensidade de luz refletida. Esta técnica é conhecida como OTDR (Optical Time Domain Reflectometry). O sistema, então, converte as propriedades da luz espalhada em temperatura por meio de calibrações feitas previamente a temperaturas conhecidas.

O tempo entre o envio dos pulsos de luz e o seu retorno é medido e fornece a informação da posição (resolução espacial), através do conhecimento da velocidade da luz na fibra.

Os testes realizados demonstraram alta resolução de temperatura ao detectar a queda de temperatura causada pela entrada de água de vazão de 0,5L/min [12], oferecendo uma vantagem crucial para a detecção precoce de danos microscópicos na capa externa.

A primeira implementação prática do sistema DTS ocorreu no campo Dalia, FPSO operado pela Total na Angola, em 2016 [11]. Para monitorar a temperatura ao longo do riser, a fibra foi incorporada na estrutura da armadura de tração dentro de pequenos tubos de aço inoxidável de diâmetro 0,64cm. O uso desse envoltório permite o uso de conectores padrão de baixo custo, sem haver a necessidade de conectores complexos.

Para atender aos requisitos rigorosos para os dados coletados, foi realizada uma média dos dados brutos para melhorar a precisão da medição, mantendo um tempo de aquisição curto. Assim, em vez de exibir o perfil de temperatura bruto ao longo do riser, os pontos de dados de temperatura foram agrupados e distribuídos em 8 zonas diferentes do riser, sendo os dados brutos do DTS armazenados para análises do perfil de temperatura ao longo de todo o riser.

A comunicação entre o sistema DTS e o riser foi implementada com base no protocolo Modbus, protocolo de comunicação padrão, amplamente utilizado em sistemas de automação industrial, e uma interface gráfica dedicada (GUI - Graphical User Interface) foi programada. Essa integração foi essencial para exibir as temperaturas em diferentes locais com a maior precisão possível.

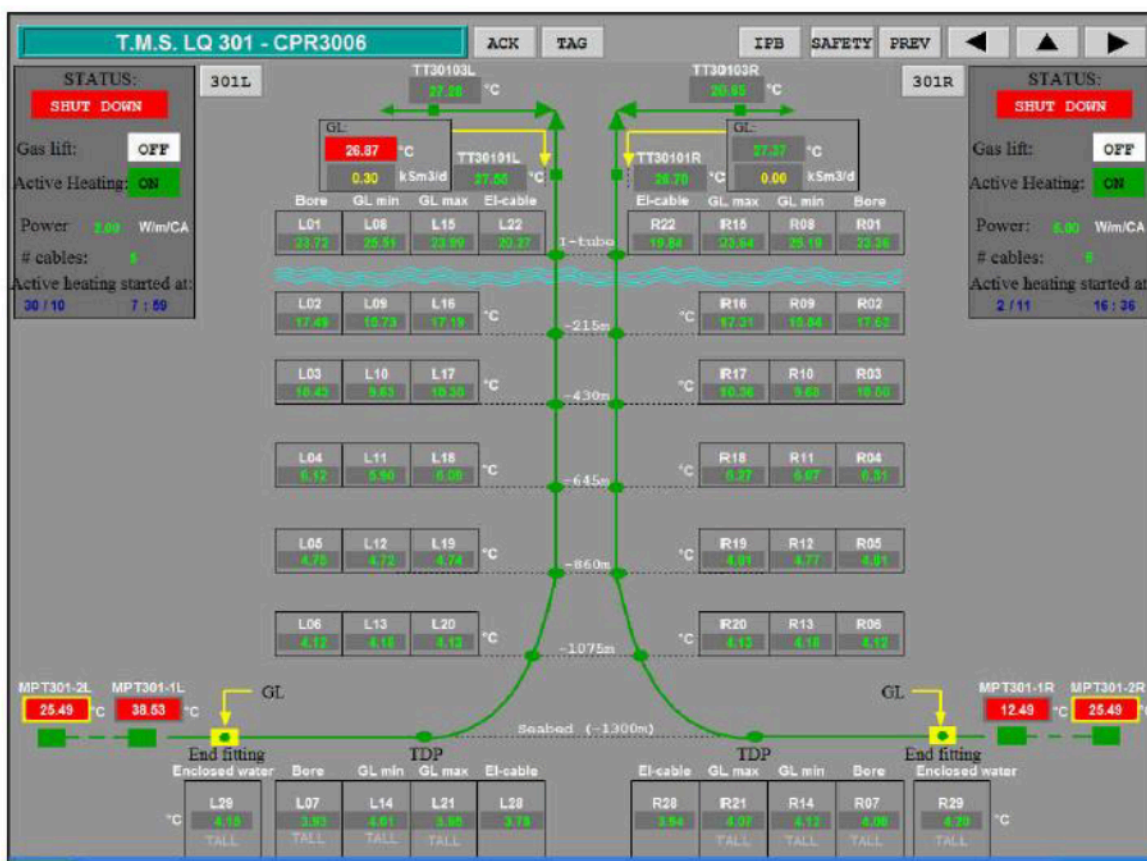


Figura 16: Visualização dos dados de monitoramento do riser na sala de controle [11]

Na visualização gráfica da Figura 16, os 8 pontos de monitoramento ao longo do riser são dispostos. Além disso, a temperatura do fluido de produção, da linha de gas lift e dos cabos elétricos são monitoradas junto com as temperaturas nos pontos mais relevantes do anular.

Esta interface gráfica não seria ideal para monitorar o ingresso de água no anular, uma vez que apresenta uma visão mais macro das condições de operação do riser. Para isso, seria necessário adaptar a visualização, focando na análise dos dados de temperatura do anular, apenas, de forma a ter uma maior amostragem que facilite a identificação do ponto e momento em que começou o ingresso de água. Porém, o painel de controle cumpriu bem o seu papel no FPSO Dalia, que era de monitorar a temperatura em diversos pontos de forma simplificada.

A implementação bem sucedida da tecnologia DTS a qualificou para aplicação no monitoramento da temperatura de risers em campo com alta resolução.

Uma vez analisados todos os dados coletados, a alta resolução de temperatura e espacial permitiu que a tecnologia também possa ser usada para

monitoramento das condições do riser durante sua vida útil, inclusive para detectar a presença de alagamento do anular.

Em 2013 foi apresentado na Offshore Technology Conference os resultados do teste realizado em escala real em um riser flexível de 200 metros de comprimento equipado com o sistema DTS para detectar alagamento no anular [12]. Para essa implementação específica, a resolução espacial na direção longitudinal do riser é de aproximadamente 8cm para dutos de até 5km, sendo que a inspeção de dutos maiores pode ser feita às custas da resolução. Neste teste, as medições foram feitas a cada 10 segundos, com uma resolução de temperatura de aproximadamente $0,1^\circ$ e resolução espacial de 15cm.

A Figura 17, retirada do artigo, mostra o resultado da leitura dos sensores.

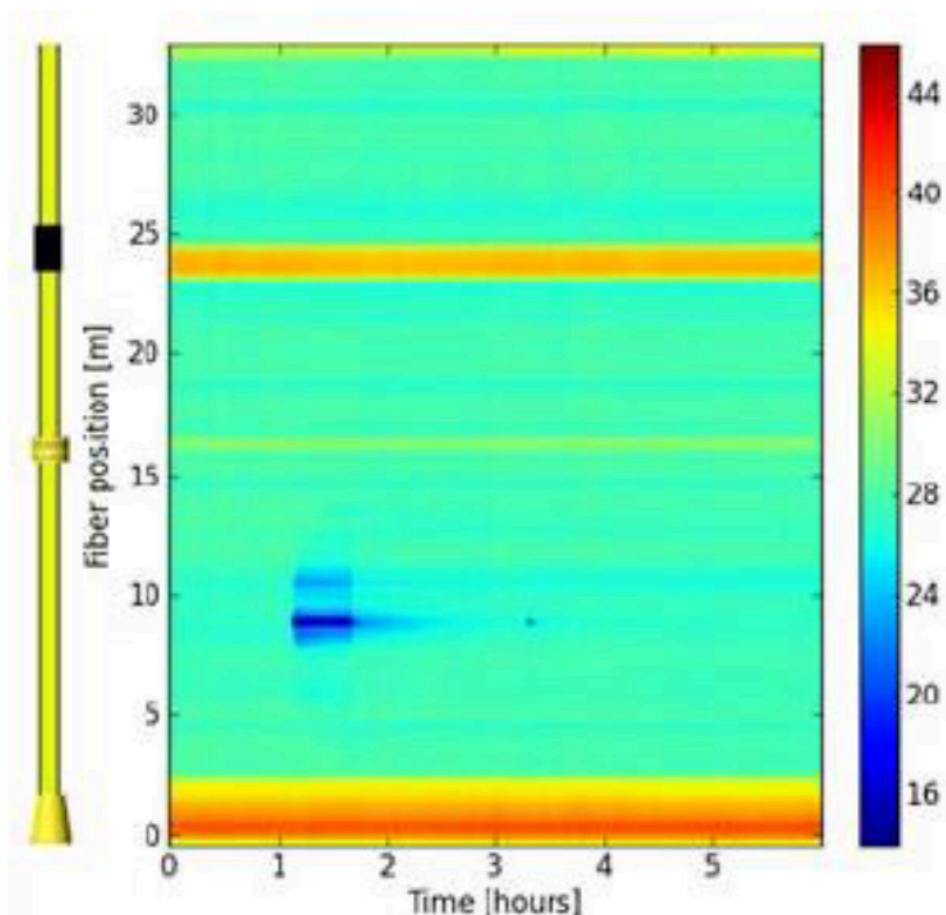


Figura 17: Teste do Sistema DTS para Alagamento a 0.5 L/min [12] (modificado)

O tempo do teste variou entre 0 e 5 horas (eixo x), e a extensão da fibra ótica no duto é representada em metros (eixo y), com valores de 0 até 30 metros. A escala de cores representa as temperaturas coletadas pela fibra ótica, começando pelo azul para temperaturas mais baixas e indo em direção ao vermelho conforme há um aumento da temperatura.

No teste, água salinizada foi inserida no anular da amostra de teste a uma taxa de 0.5L/min, representando um pequeno fluxo que só poderia ocorrer por um dano microscópico na capa externa. A entrada de água começou 1 hora após o início do teste e na posição de 9 metros (posição a).

Na Figura 17, a mancha azul representa uma queda na temperatura da fibra ótica, que coincide com a exata posição e momento em que começou a entrada de água no anular (posição a).

Pode ser observado que a água se espalha durante a meia hora em que foi bombeada para o anular, e a temperatura nesse período permaneceu mais baixa. É interessante notar também o pequeno ponto nos dados em que ocorreu uma breve queda de temperatura em 3.3 horas e 9 metros de comprimento do tubo (posição b), causada pela entrada de cerca de 0,5 litros de água que estava na mangueira de conexão quando foi desconectada na extremidade superior. Trata-se de um volume muito pequeno de água a uma pressão muito baixa (aproximadamente 0,2 bar), mas que ainda assim aparece no perfil.

Com base nos resultados dos primeiros testes, um algoritmo de detecção foi desenvolvido para identificar mudanças de temperatura. O algoritmo é uma análise de dados que pode ser aplicada aos dados de temperatura e que indicará se algo incomum está acontecendo de forma automatizada. Se o valor para um determinado intervalo de tempo for superior a 1, algo incomum está ocorrendo. A força do evento calculada com o algoritmo do teste acima é mostrada na Figura 18.

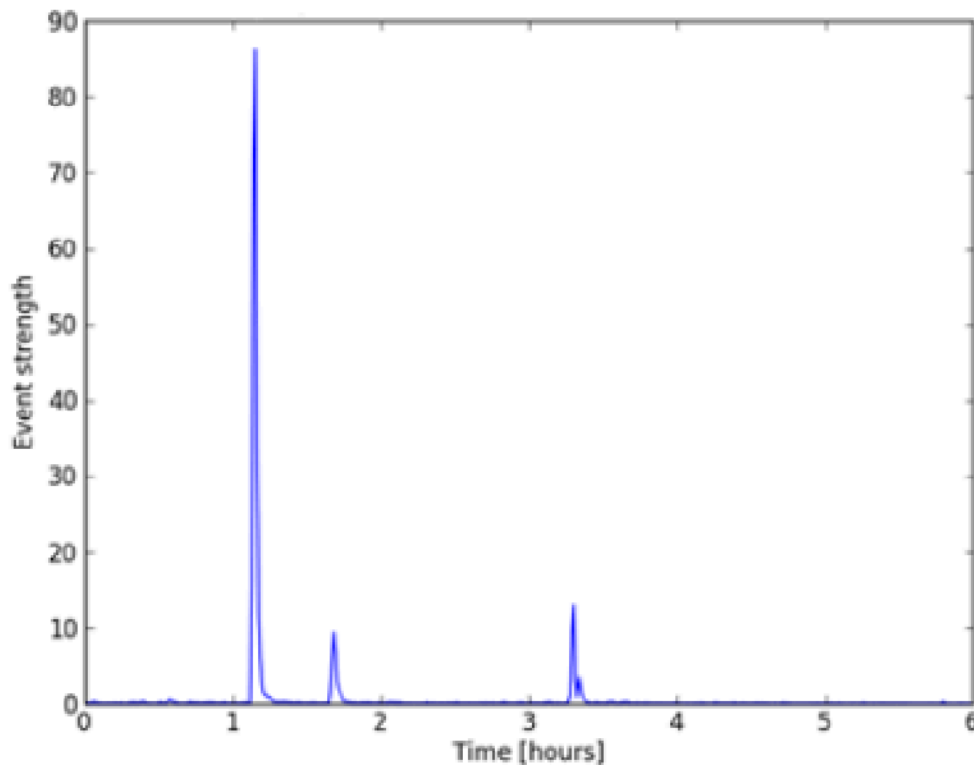


Figura 18: Força do evento (event strenght) [12]

Na visualização gráfica, a entrada de água a 1.1 hora é extremamente clara, e o fim do bombeamento de água a 1.7 horas e subsequente vazamento acidental em 3.3 horas também foram identificados. Pode-se notar também que os valores de força do evento estão muito próximos de zero quando nada está ocorrendo, o que mostra a capacidade do algoritmo de diferenciar o alagamento de outro evento estático.

Os resultados desse teste foram conclusivos em validar a capacidade da utilização do monitoramento de temperatura em tempo real feito pelo sistema DTS para detectar e localizar rupturas na capa externa, seguida da entrada de água no anular de risers flexíveis, até para pequenas vazões causadas por falhas microscópicas.

Uma otimização de grande valor para o dispositivo DTS aplicado para detecção de alagamento no anular dos risers seria adaptar essa visualização para uma versão que possa ser adotada nas plataformas de forma automatizada, como feito no FPSO Dalia, para detectar a entrada de água nos dutos monitorados de forma simplificada e instantânea.

A partir da análise da técnica DTS e, levando em consideração os critérios comparativos adotados, alcança-se o seguinte resultado:

I. Maturidade Tecnológica (TRL - Technology Readiness Level):

Esta técnica é amplamente utilizada em diversas indústrias para monitoramento de temperatura ao longo de extensões consideráveis. No contexto de risers flexíveis, o uso pioneiro de DTS no FPSO Dalia [11], confirmando sua aplicação em um ambiente offshore real, coloca a tecnologia no TRL 8, nível em que ela está completamente desenvolvida e qualificada por meio de testes e demonstração. Na qualificação, o sistema foi integrado ao riser, monitorando continuamente o comportamento térmico para detectar alagamentos, o que válida a alta maturidade da tecnologia.

II. Confiabilidade:

A implementação do sistema no FPSO Dalia [11] apresentou resultados com altíssima resolução de temperatura e resolução espacial, permitindo detectar variações térmicas mínimas. Além disso, os resultados do teste em escala real apresentados na OTC comprovaram com sucesso a capacidade do dispositivo DTS em detectar vazamentos causados por brechas muito pequenas na capa externa, e os dados apresentaram uma resolução de temperatura de aproximadamente $0,1^\circ$ [12]. As aplicações do equipamento DTS forneceram informações precisas sobre as condições do duto inspecionado, indicando uma alta confiabilidade.

III. Monitoramento Contínuo vs. Inspeção Pontual:

Uma vez instalado o duto com o sistema DTS, é possível que todo o seu comprimento seja monitorado na sala de controle do FPSO. Os dados coletados passam por um protocolo, como o Modbus, para comunicar os dados coletados pelo interrogador ótico à central de controle. Uma interface gráfica pode ser usada para tornar a leitura dos dados intuitiva e facilitar a identificação da entrada de água no anular, facilitando a supervisão pelos operadores [11].

IV. Intrusividade:

A instalação de fibras ópticas para DTS em risers já operacionais não é viável, uma vez que a fibra é instalada junto com os arames da armadura de tração durante a fabricação do duto. Logo, apesar de ser uma técnica não intrusiva, ela não é adaptável para risers sem o sistema que já estão em operação.

V. Capacidade de Localização do Alagamento:

O dispositivo testado em uma amostra de 200 metros de comprimento apresentou uma resolução espacial de 15cm, sendo, portanto, capaz de identificar o tramo que está alagado [12].

VI. Custos e Viabilidade Econômica:

Uma vez instalada, o monitoramento dos dados coletados pelo DTS pode ser acompanhado pelos operadores na sala de controle [11], representando um custo mínimo para coleta e análise de dados. Assim, os custos do sistema DTS estão associados apenas à aquisição do equipamento de monitoramento, incluindo a fibra óptica e um sistema de aquisição de dados remoto, além da instalação da fibra durante a fabricação do duto.

3.2 RADIOFREQUÊNCIA (RFID)

A tecnologia de RFID apresentou um dos mais rápidos crescimentos na indústria, comparável aos avanços das tecnologias dos celulares e telefones sem fio. A versatilidade da tecnologia em conjunto com a possibilidade de operação em diferentes bandas possibilitou a inserção em diversas aplicações.

O avanço tecnológico na área dos semicondutores possibilitou a redução dos custos de fabricação do dispositivo. Esse fato, somado a criação de normas e plataformas comuns facilitou seu processo de globalização, culminando na grande aplicabilidade destes dispositivos nos dias de hoje.

O sistema pode ser aplicado no rastreamento de objetos, identificação de funcionários, controle de tráfego e outros. Assim, devido à possibilidade de identificação e de transferência de energia e de dados sem contato, estes dispositivos foram denominados de dispositivos de identificação por radiofrequência, RFID [14].

Sua aplicabilidade como sensor de deformação e deslocamento pode ser baseada no fato de que o sensor, ao sofrer esforço mecânico, altera suas dimensões e estas dimensões estão relacionadas ao comprimento elétrico do sensor, que, por sua vez, está correlacionado à frequência de ressonância. Assim, é possível correlacionar a frequência de ressonância com a deformação ou deslocamento do material [15].

O processo corrosivo também pode ser detectado com o uso de sensores RFID [16]. Com o uso do mecanismo de acoplamento indutivo foi possível detectar alterações de tensão no equipamento de leitura à medida que o processo corrosivo acelerava.

A detecção de umidade pelos sensores RFID também já é comprovada. Um estudo do uso de sensores para a detecção de alagamento foi conduzido para verificar a variação da frequência de ressonância quando ocorre uma variação no meio, como mostrado pela figura abaixo.

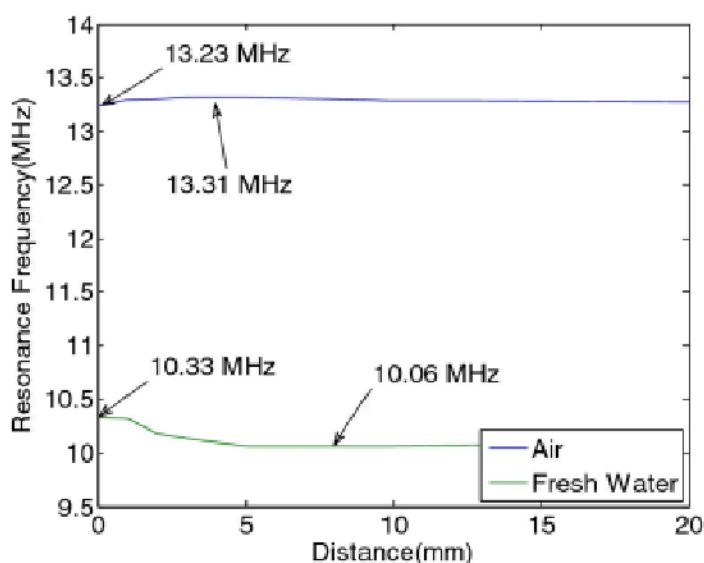


Figura 19: Valores da frequência de ressonância em função da distância quando exposto em meio ao ar e a água. [17]

Na Figura 19, a frequência de ressonância foi coletada pelo mesmo dispositivo de radiofrequência ao longo de 20mm de distância na condição seco e molhado. A linha azul representa os dados coletados pelo dispositivo quando exposto ao ar, com valores de frequência de ressonância na faixa de 13,23 até 13,31 MHz. A linha verde representa os dados relativos ao sensor exposto à água, com valores entre 10,06 e 10,33 MHz. A comparação entre os dois valores evidencia a capacidade do dispositivo de comprovar a presença de água sobre o sensor, com uma variação de frequência de ressonância em torno de 3MHz [17],

Uma vez comprovada a eficácia do dispositivo RFID de detectar alagamento, foi desenvolvido a sua versão de monitoramento para a condição, seco ou alagado, do anular de dutos flexíveis.

O dispositivo RFID é composto de 2 componentes principais, o transponder, que será chamado de sensor, e o interrogador. O sensor é posicionado sobre o objeto a ser medido, e o interrogador é responsável pela leitura e gravação de dados e pelo fornecimento de energia para o dispositivo.

Os sensores do dispositivo RFID são instalados na camada dos arames de tração do riser e o leitor é acoplado na sua capa externa, podendo assim ser

colocado e retirado a qualquer momento. O leitor é conectado a um computador através de um cabo USB para receber os dados e a identificação de cada sensor.

A Figura 20 apresenta os componentes típicos de um dispositivo RFID.

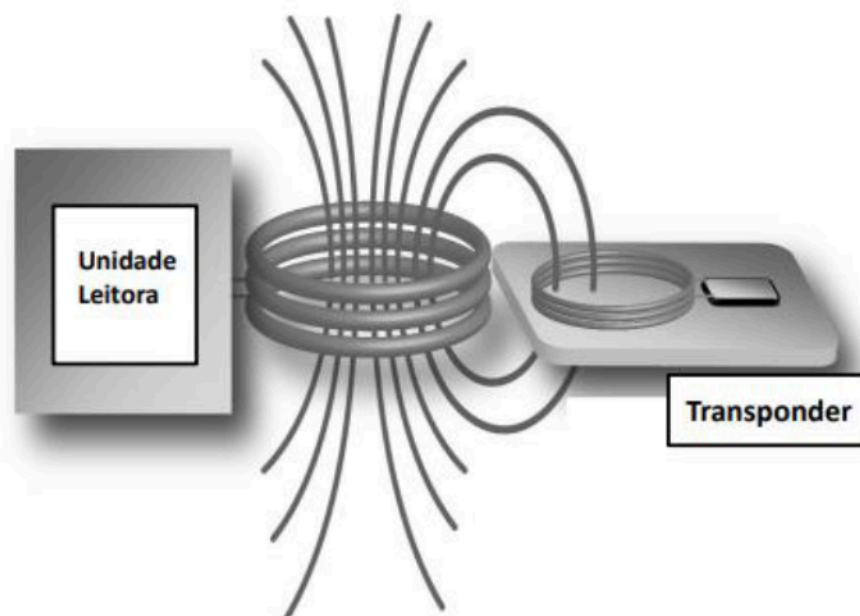


Figura 20: Dispositivo RFID com seus componentes [6]

O dispositivo RFID baseia-se no acoplamento indutivo, um método que depende do compartilhamento de linhas de um campo magnético alternado entre os dois componentes, permitindo a transmissão de energia e informação entre eles.

A bobina do leitor é energizada por uma corrente alternada, gerando um campo magnético alternado. O campo magnético gerado pelo leitor induz uma corrente elétrica na bobina do sensor, que vai usar essa energia para alimentar seu circuito interno.

A transferência de informações ocorre por meio da modulação de carga, onde as alterações no campo magnético são detectadas pelo leitor e interpretadas como dados.

O circuito elétrico equivalente do dispositivo RFID é representado pela Figura 21:

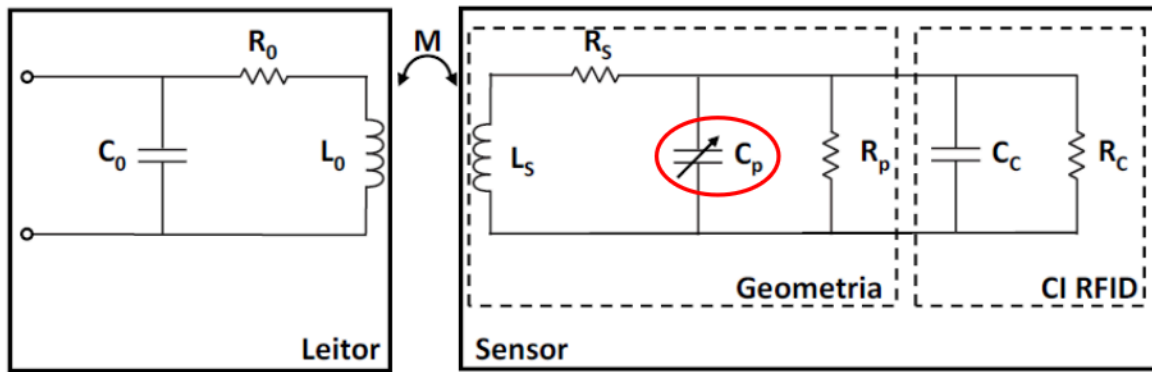


Figura 21: circuito elétrico do dispositivo leitor/sensor

Onde:

- C_0 - Capacitância do leitor [F]
- L_0 - Indutância do leitor [H]
- R_0 - Resistência do leitor [Ohm]
- L_S - Indutância da bobina do sensor [H]
- R_S - Resistência da bobina do sensor [Ohm]
- C_p - Capacitância Parasita da bobina do sensor [F]
- R_p - Resistência representativa do dielétrico [Ohm]
- C_C - Capacitância do componente integrado RFID [F]
- R_C - Resistência do componente integrado RFID [Ohm]

A capacitância parasita do sensor (C_p) é a capacidade da bobina do sensor de armazenar carga elétrica. Ela é representada pelo símbolo de um capacitor variável pois, quando há uma alteração na condição do meio (por exemplo, de seco para alagado), a permissividade do meio varia, o que resulta em uma modificação no seu valor.

A variação no valor da capacitância parasita afeta diretamente a capacitância equivalente do sensor, alterando a frequência de ressonância do sistema RFID, relação que pode ser entendida pelas equações abaixo:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_s C_e}}$$

Onde:

- f_0 – Frequência de ressonância [Hz]
- C_e - Capacitância equivalente do sensor [F]

$$C_e = C_p + C_c$$

O sensor é projetado para ter uma frequência de ressonância específica, que é alterada pela variação da capacitância parasita do sensor no caso de alguma anomalia. Assim, a frequência de ressonância é utilizada como sinal de referência para determinar a condição do meio ao redor do sensor.

A reflexão e a transmissão de ondas eletromagnéticas em linhas de transmissão são frequentemente associadas aos parâmetros de espalhamento, parâmetros S. O parâmetro S_{11} descreve o comportamento de redes elétricas lineares devido à influência de sinais elétricos [6].

Este parâmetro é usualmente obtido com o uso de analisadores de rede e pode ser utilizado como sinal de referência para verificar alterações da condição do anular seco para a condição do anular alagado.

Em 2021, Kuhn apresentou os resultados da sua pesquisa a respeito da tecnologia RFID aplicada à risers. Com o objetivo de realizar um teste de escala média mais próximo da realidade, os sensores foram instalados em um segmento de duto flexível por meio de uma abertura na camada polimérica, que foi posteriormente soldadas em sua posição original, conforme a Figura 22.



Figura 22: Teste em média escala em um corpo de prova [6] (modificado)

As leituras foram feitas com o anular seco, durante o alagamento e seguiram por um ano para verificar se os sensores sofreram alguma degradação ao longo do tempo.

O resultado dos ensaios de média escala podem ser verificados nos gráficos a seguir. As curvas de leitura médias estão representadas em vermelho, os sinais das aquisições estão em pontilhado preto e as curvas com linha preta contínua representam os valores máximos e mínimo obtidos em todas as aquisições. A figura abaixo apresenta as curvas do parâmetro S_{11} em função da frequência para as condições de anular seco e alagado para sensores espaçados de leitores a uma distância de duas camadas poliméricas, 20 mm.

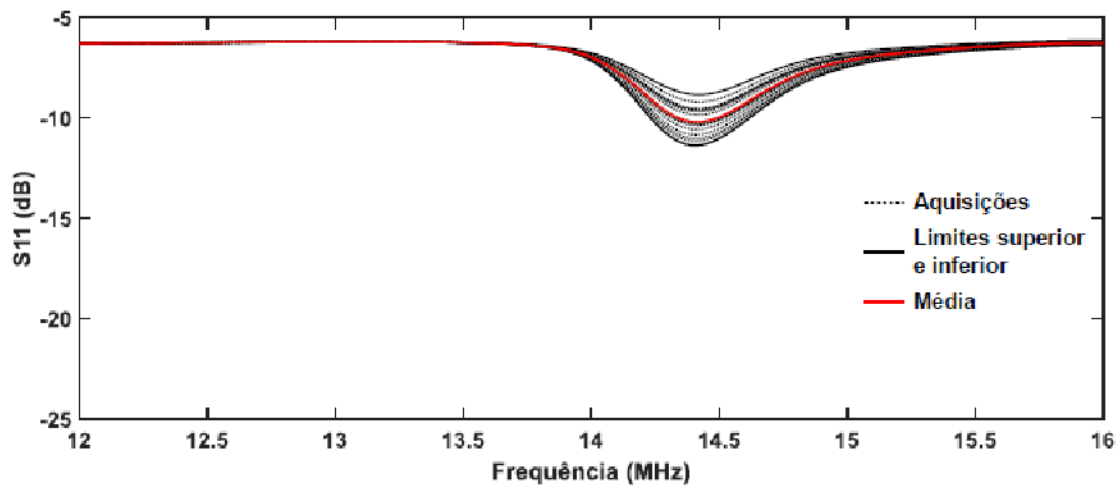


Figura 23: Resultado experimental do anular na condição seco [6]

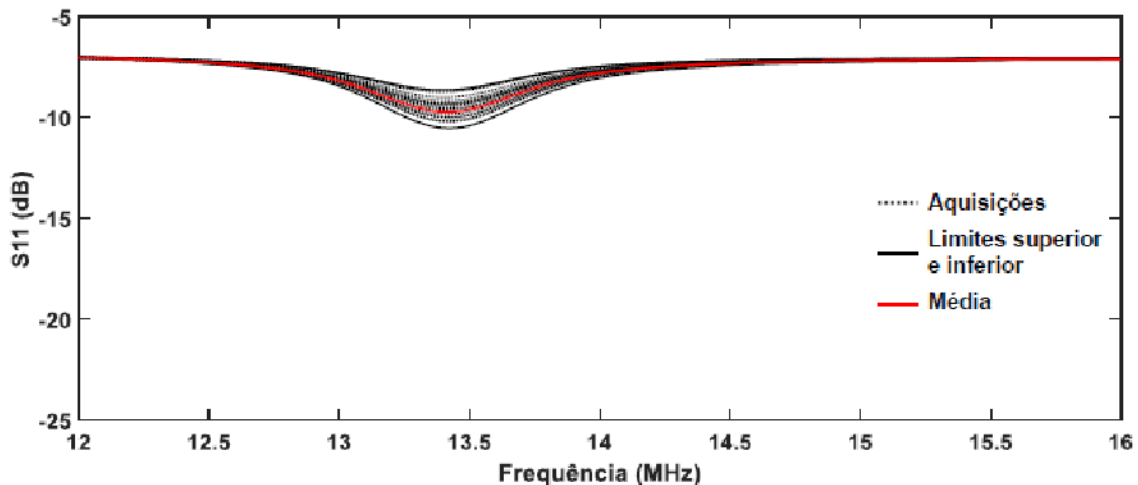


Figura 24: Resultado experimental do anular na condição alagado [6]

O Figura 23 apresenta as leituras da amplitude do parâmetro S_{11} da amostra na condição seca, na qual ocorre uma queda de amplitude na frequência de ressonância média de 14,32 MHz. Na figura 24, para o anular alagado, a queda da amplitude do parâmetro S_{11} ocorre na frequência média de 13,3 MHz. A variação da frequência de ressonância foi de aproximadamente 1MHz entre as condições de anular seco e alagado.

Durante a avaliação dos resultados obtidos do parâmetro S_{11} , foi identificado que a amplitude deste parâmetro reduz à medida que o standoff, distância entre o transponder e o leitor, aumenta. Essa análise indica que uso de revestimentos poliméricos reduz a influência do meio sobre a frequência de ressonância do

sensor, logo, o dispositivo precisa ser aprimorado para que seja aplicável à risers com grande standoff.

Em seguida, um estudo do comportamento do dispositivo ao longo do tempo foi realizado. A Figura 25 apresenta as frequências de ressonância e os valores do parâmetro S_{11} em função do tempo. A seta branca indica o instante onde inicia o alagamento ao redor do sensor.

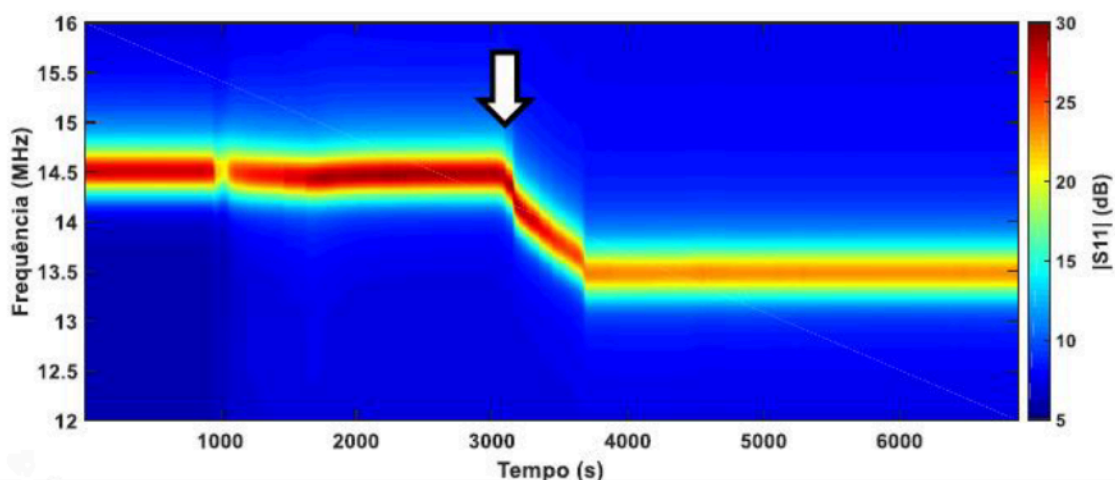


Figura 25: Análise da frequência e do parâmetro S11 em função do tempo [6]

Para cada ensaio de alagamento, foram obtidas reduções significativas nos valores da frequência de ressonância, com uma queda de frequência de aproximadamente 14,5 MHz no anular seco para 13,5 MHz no anular alagado. Além disso, com a entrada de água houve também uma redução do módulo da intensidade do parâmetro S_{11} , mudando a cor dos sinais do vermelho escuro para um alaranjado.

O valor da frequência de ressonância em função do tempo é plotado na Figura 26.

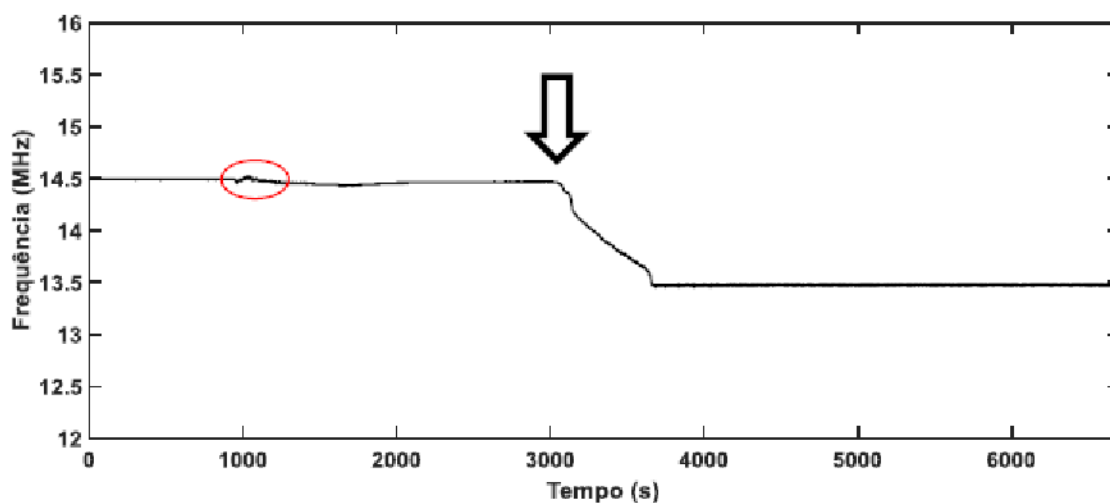


Figura 26: Comportamento da frequência de ressonância em função do tempo [6]

É possível verificar nos gráficos os dois patamares: o superior representando o sinal para a condição do anular seco; e o inferior representando o sinal para condição do anular alagado. As setas brancas indicam o momento em que se inicia o alagamento do sensor.

O círculo em vermelho indica uma interferência externa ao leitor, que ocorreu no momento em que o leitor entrou em contato com água. A baixa variação dos valores medidos neste momento evidencia que o leitor pode realizar a leitura dentro do mar sem grandes prejuízos.

Os resultados obtidos evidenciam a sensibilidade do dispositivo para detectar o ingresso de água para revestimentos de até 20mm, capacidade de grande importância uma vez que o ingresso de água pode se dar de forma mais lenta, com a água permeando para o anular. Assim, quando o sensor está parcialmente imerso em água já ocorrem alterações detectáveis na frequência de ressonância.

Apesar dos resultados bem sucedidos nos testes, os desafios dessa aplicação ainda são enormes. É necessário o desenvolvimento do equipamento de leitura de forma que possa ser conduzido por um ROV até o local de leitura, aonde está instalado o sensor, para realizar a inspeção. Além disso, a capacidade de leitura para estruturas com um standoff maior que 20mm vai ser necessária para a tender uma gama maior de dutos.

A avaliação da técnica de RFID e os critérios comparativos definidos anteriormente conduzem ao seguinte resultado:

I. Maturidade Tecnológica (TRL - Technology Readiness Level):

A utilização de sensores RFID para detecção de alagamento em dutos flexíveis tem sido objeto de pesquisas recentes. O estudo de Kuhn [8] demonstrou a viabilidade dessa aplicação simulando o alagamento em um corpo de prova, o que indica que a tecnologia está no TRL 5, grau de validação em ambiente relevante.

II. Confiabilidade:

O estudo de Kuhn demonstrou que sensores RFID podem detectar alagamento por meio da variação na frequência de ressonância, com reduções de até 1,25 MHz. A influência de fatores externos como, temperatura ambiente, inclinação e excentricidade, foram consideradas negligenciáveis, indicando uma confiabilidade promissora em condições controladas.

Apesar disso, o dispositivo demonstrou uma considerável redução na amplitude do parâmetro S_{11} com o aumento da camada polimérica entre o transponder e o leitor. O uso de revestimentos poliméricos reduz a influência do alagamento na frequência de ressonância do leitor, logo, o sistema ainda precisa ser aprimorado para que seja aplicável em risers com diferentes standoffs.

III. Monitoramento Contínuo vs. Inspeção Pontual:

O dispositivo RFID pode ser utilizado para inspeções pontuais. Os sensores podem ser interrogados periodicamente para verificar a condição do anular, mas precisam de um ROV para acoplar o leitor próximo ao sensor e realizar as medições.

Uma adaptação do leitor para que ele fique instalado no riser de forma definitiva pode ser estudada, mas seria necessário avaliar como seria feita a transmissão do cabeamento de sinais para a plataforma.

IV. Intrusividade:

Sensores RFID são preferencialmente instalados no riser durante sua fabricação, uma vez que os sensores são acoplados nos arames da armadura tração do riser.

Para adaptar o dispositivo a risers já instalados, é necessário remover as camadas poliméricas para acessar a camada metálica do duto, e em seguida, ressoldar em suas posições originais. Esta técnica não é muito recomendada uma vez que pode resultar na perda das propriedades de resistência e estanqueidade do duto, além de que essa adaptação só poderia ser feita na região seca do riser, já que a exposição do anular dentro do mar resultaria no seu alagamento instantâneo.

V. Capacidade de Localização do Alagamento:

A localização do alagamento estará condicionada à posição dos sensores ao longo do duto, ou seja, se um dos sensores detectar alagamento, a localização do alagamento será a mesma que a do sensor.

VI. Custos e Viabilidade Econômica:

A sistema RFID consiste em duas partes principais, os sensores que são instalados durante a fabricação do duto, e o leitor, parte do equipamento que depende de um ROV para ser acoplado no riser [8].

Em contrapartida, a coleta e análise dos dados pode ser automatizada caso uma adaptação do sistema para operar em monitoramento seja viável, e uma análise simplificada pode ser adotada para os dados coletados na inspeção, eliminando a necessidade de mão de obra especializada e possibilitando a análise dos dados e apresentação dos resultados de forma rápida.

3.3 RAIOS GAMA

A técnica de transmissão de raios gama é uma ferramenta já consolidada e muito utilizada na inspeção não destrutiva em diversos setores da economia. Na agricultura, para determinação da densidade e umidade de solos, ou para o estudo de concentrações na indústria química sem interferir no processo de sedimentação, por exemplo.

Na técnica de transmissão de raios gama para inspeção do anular de risers flexíveis, uma fonte de radiação gama é posicionada em um lado do duto enquanto um detector é instalado no lado oposto, conforme representado na Figura 27.

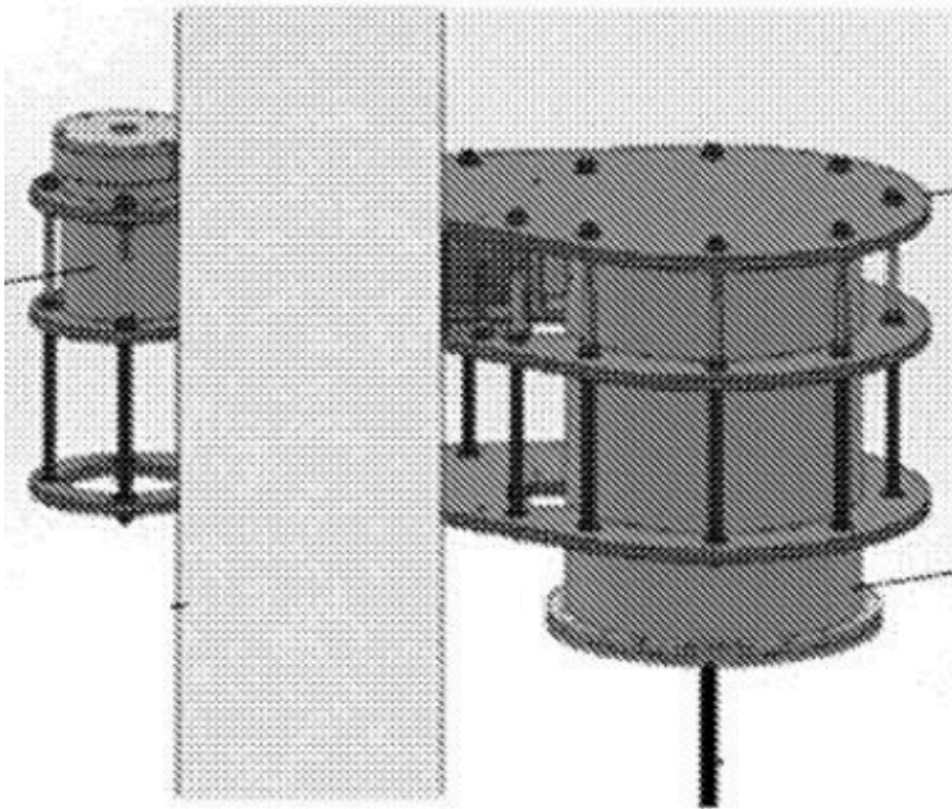


Figura 27: Sistema de inspeção de raios gama [18] (modificado)

A técnica de transmissão gama está baseada no princípio de atenuações da lei de Beer-Lambert. A Lei de Beer descreve a atenuação da luz à medida que ela passa por uma substância absorvente. Para raios gama, a sua atenuação ocorre principalmente por três interações:

- Efeito Fotoelétrico, quando a energia total de um fóton gama é transferida a um único elétron orbital, que é expelido.
- Espalhamento Compton, no qual a energia de radiação aumenta e ocorre uma interação entre o fóton gama e um elétron orbital, sendo parte da energia do fóton transferida como energia cinética para o elétron. O fóton espalhado terá uma energia menor e uma direção diferente do incidente.
- Produção de pares, ocorre quando fótons de alta energia passam interagindo com o núcleo e desaparecendo, dando origem a um par elétron-positron.

A Lei de Beer estabelece que quando um feixe de fótons de intensidade I_0 , emitido por uma fonte radioativa, atravessa um material composto por n camadas de elementos e espessuras diferentes, sofrendo atenuação de modo que a intensidade I do feixe emergente é representada pela equação abaixo:

$$I = I_0 \exp \left(- \sum_{i=1}^n \mu_i x_i \right)$$

Onde:

- x_i representa a espessura;
- μ_i representa o coeficiente de atenuação total ou linear de cada camada;
- I_0 é a intensidade do feixe incidente;
- I é a intensidade do feixe emergente;

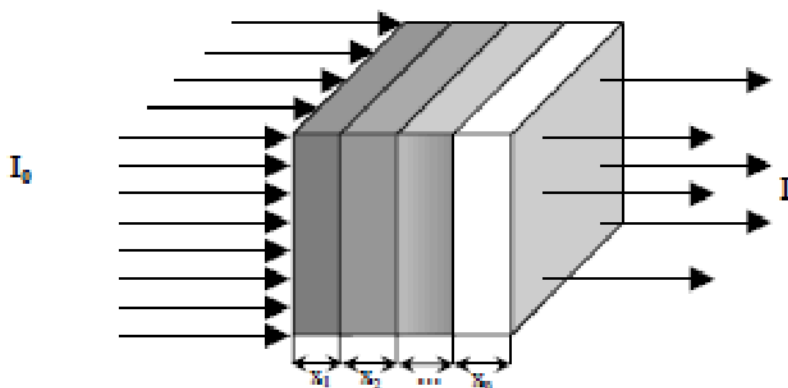


Figura 28: Feixe de radiação atenuado por um material não homogêneo de n camadas de espessuras e coeficientes de atenuação diferentes. [19]

Como a absorção da radiação depende da espessura e da densidade do material, como representado pela Figura 28, variações da densidade no interior da amostra examinada podem ser traduzidas por variações na intensidade da radiação emergente. Ou seja, alterações no sinal de saída do dispositivo indica uma mudança na condição do material que está sendo inspecionado.

A primeira versão do equipamento é composta por 3 vasos de pressão. O primeiro compreende a fonte radioativa encapsulada, o segundo compreende os sensores de radiação e o terceiro compreende os meios elétricos de coleta e amplificação de sinais. O conjunto possui ainda um arco de circunferência, responsável por permitir o encaixe da estrutura no riser. O desenho esquemático do dispositivo é representado pela Figura 29.

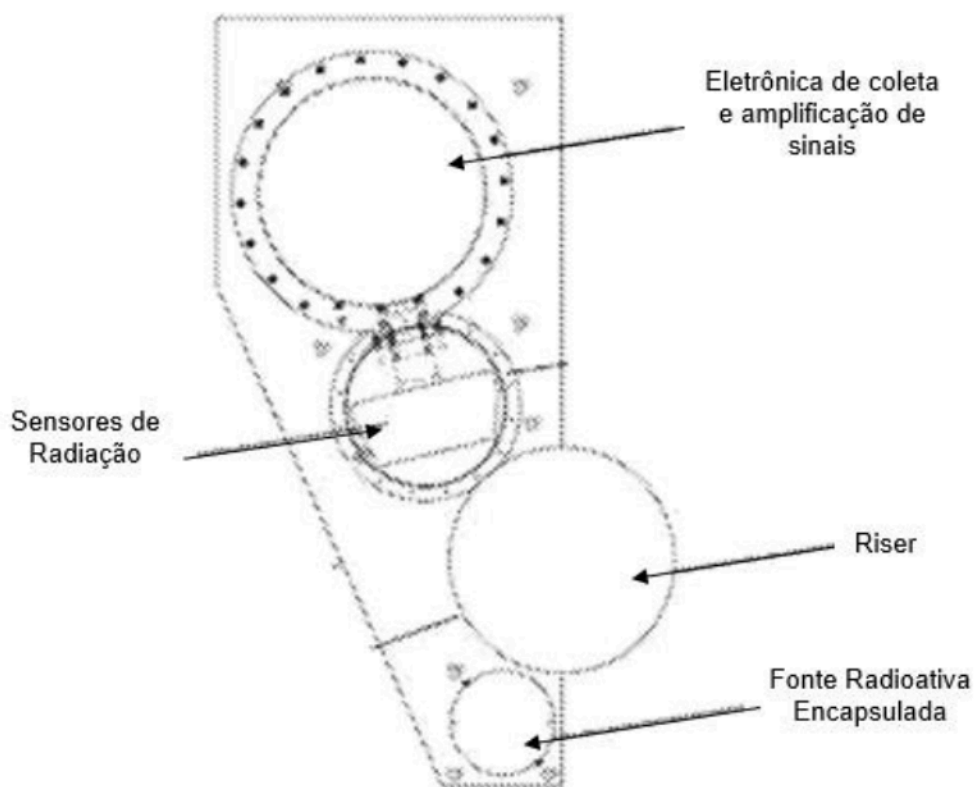


Figura 29: Detalhes do dispositivo de detecção por radiação gama [18] (modificado)

A fonte radioativa encapsulada possui meios de locomoção do isótopo, de modo a modificar o seu posicionamento no interior do primeiro vaso de pressão, permitindo o início e o final da exposição do conjunto de tubos interligados à radiação ionizante. Os meios de locomoção podem compreender um acionamento hidráulico ou elétrico proveniente do feixe de cabos elétricos e mangueiras.

A fonte radioativa é posicionada durante a inspeção para que o duto fique exposto para que a coleta de sinais aconteça. Os sensores de radiação, por sua vez, são programados para adquirir um certo número de contagens de fótons de radiação através de um dispositivo de controle,

O acoplamento do dispositivo no duto a ser inspecionado é feita preferencialmente pelo acoplamento do mesmo a um ROV através de um braço de controle como ilustrado na Figura 30. Todo o controle e funcionamento do dispositivo é feito pela conexão elétrica entre o dispositivo e o ROV.

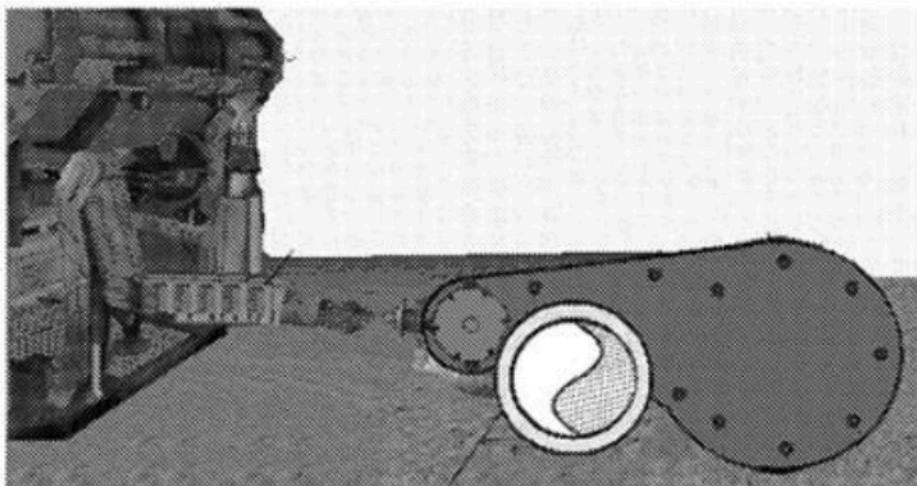


Figura 30: Esquemático do dispositivo de radiação gama acoplado ao ROV [18]

Como a fonte radioativa encapsulada, os sensores de radiação e o sistema eletrônico de coleta e amplificação de sinais estão envoltos em vasos de pressão, o dispositivo pode ser utilizado em grandes profundidades sem que seu funcionamento seja prejudicado pela elevada pressão do ambiente.

Quando o anular do riser estiver seco, o tempo para que cada sensor atinja o número de contagens pré-definida será significativamente menor quando comparada a condição de anular alagado.

Os resultados obtidos correspondentes aos intervalos de tempo que cada sensor de radiação complete as contagens são acumulados e analisados, comparando a condição de leitura de um riser seco. Essa comparação é realizada com o auxílio de ferramentas matemáticas de cálculo estático, fornecendo um diagnóstico da condição do riser com pelo menos 95% de confiança [18].

Um protótipo do equipamento foi desenvolvido e testado em 2006 com o auxílio de uma amostra de riser [19]. Foram feitas leituras da amostra preenchida com óleo, água, areia e ar. Os dados foram analisados e tabelados para comparar a taxa de contagem para cada conteúdo.

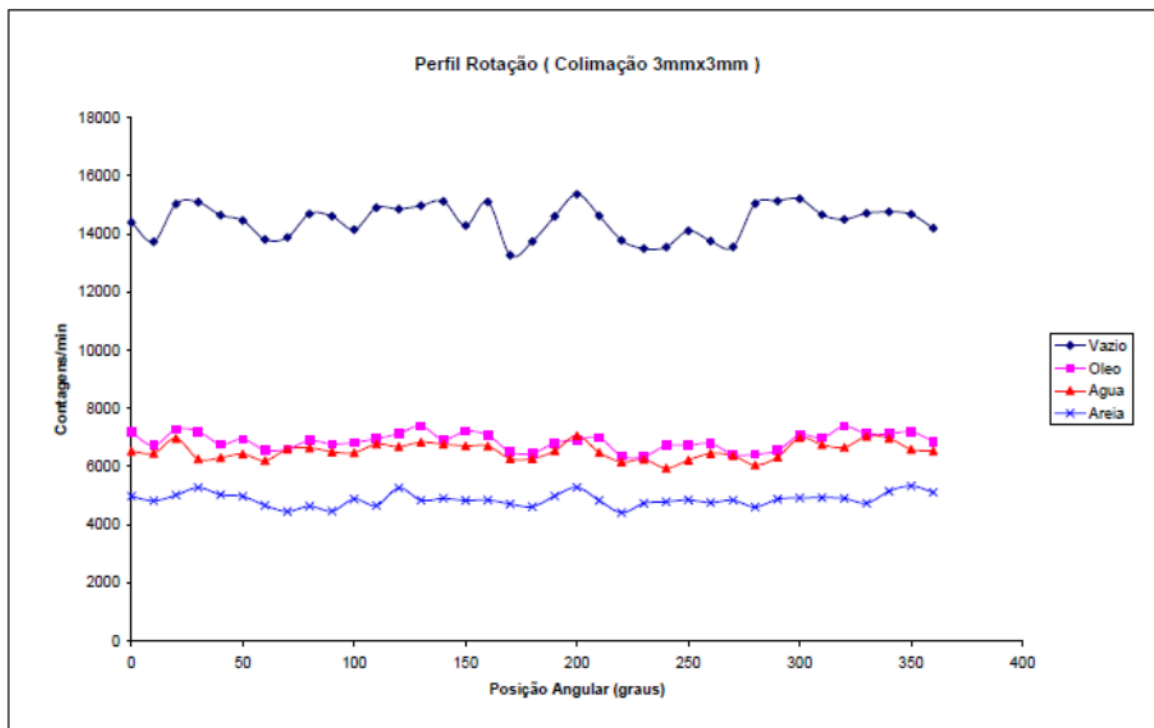


Figura 31: Perfil das densidades para a amostra preenchida com cada conteúdo. [19]

Os dados plotados na Figura 31 relacionam a contagem por minutos (eixo y) em relação a posição em graus (eixo x), e a Tabela 1 apresenta a contagem média por minuto para cada conteúdo da amostra relevante para o presente estudo.

Tabela 1: Resultados do teste de perfil de rotação

Conteúdo do Duto	Contagem média/min	Desvio Percentual
Vazio	14437 +- 573	4,0%
Óleo	6964 +- 303	4,4%
Água	6729 +- 282	4,2%
Areia	4958 ± 275	5,5%

Pode ser observado que a contagens/min da amostra vazia é significativamente maior do que quando comparada com a amostra preenchida com água, óleo ou areia.

O maior valor de contagem por minutos pode ser traduzido pela maior facilidade da radiação em cruzar o riser até o leitor, logo, maior a intensidade do feixe emergente. De acordo com a Lei de Beer, a densidade e a espessura do conteúdo a ser cruzado vão impactar na intensidade do feixe coletado pelo leitor. Como todos os casos foram medidos com a mesma espessura, o que vai alterar o resultado final é a densidade do material. Assim, quanto menor for a densidade do fluido a ser cruzado, maior será a intensidade do feixe emergente e a contagem por minutos.

Isso explica porque a radiação cruzou o ar com maior facilidade, com uma faixa de aproximadamente 14.000 contagens/min, seguido da água e do óleo, que possuem uma densidade relativamente próxima nesse contexto e apresentaram leituras na ordem de 7.000 contagens/min, sendo a areia o conteúdo em que a radiação apresentou maior dificuldade de cruzar, em aproximadamente 5.000 contagens/min.

No segundo teste, foram feitas leituras na amostra com diferentes quantidades de água. Na Figura 32, o eixo x apresenta a posição do feixe de radiação em relação a amostra, considerando uma varredura e o eixo y apresenta a contagem por minuto.

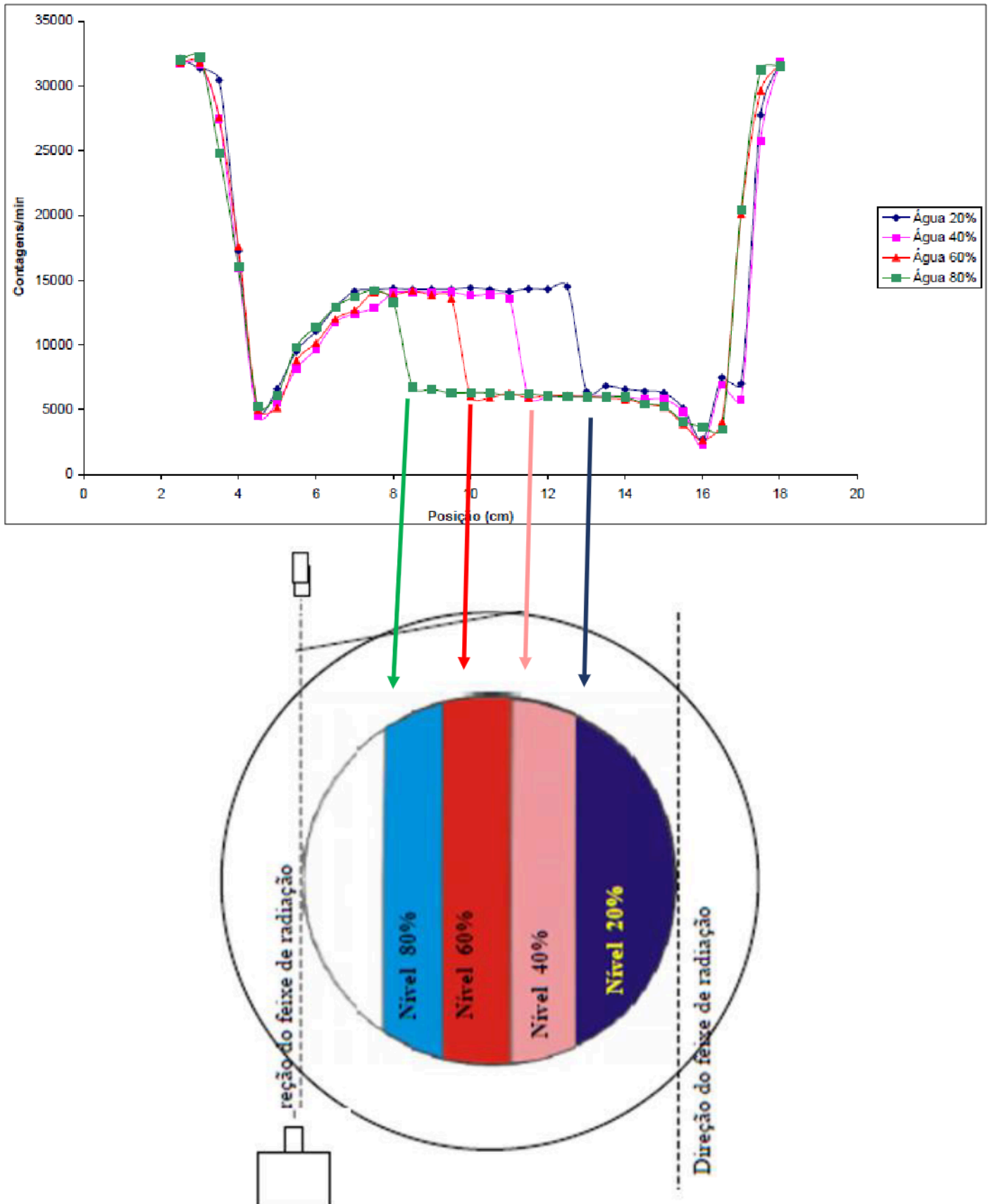


Figura 32: Variação do nível de água dentro do riser [19]

A varredura é feita na amostra preenchidas com diferentes quantidades de água. A leitura segue um padrão de contagem para a amostra seca, começando a leitura do duto na posição de 4cm, aumentando gradativamente conforme o feixe passa pelas camadas do anular e estabilizando em torno de 15.000 contagens/min ao cruzar o trecho do duto vazio.

Uma queda de mais de 5.000 contagens/min ocorre quando o feixe passa pelo conteúdo, que nesse caso é a água, durante a varredura. A posição da queda se antecipa conforme o duto é preenchido com mais água, como identificado com as setas coloridas para cada percentagem de líquido no duto.

Os dados evidenciaram a capacidade do equipamento de detectar a presença de água por meio da variação da contagem por minuto obtida. Através dos resultados obtidos neste teste, mostrou-se viável a aplicação da técnica de raios gama para inspeção de dutos flexíveis.

Em 2022, a ferramenta foi testada em condições submersas em parceria com a Petrobras [20]. No experimento, amostras de dutos flexíveis com anular seco e alagado foram submetidas a leitura em uma piscina com a primeira versão do dispositivo de inspeção usando transmissão de raios gama. Testes estáticos foram realizados para analisar os resultados de ambas as condições do anular, e o dispositivo foi capaz de diferenciar as leituras e detectar a presença de água na região do anular.

Como a inspeção será feita de forma pontual, não há necessidade de adaptar a análise dos dados para que seja feita na sala de controle do FPSO, mas será interessante criar um software que disponha os dados de forma simples, possibilitando a apresentação dos resultados da forma mais rápida possível.

Após a avaliação da técnica de raios gama e a aplicação dos critérios comparativos definidos, chega-se ao seguinte resultado:

I. Maturidade Tecnológica (TRL - Technology Readiness Level):

A técnica de transmissão de radiação gama foi desenvolvida e testada em laboratório, aonde pode ser comprovada a sua capacidade de detectar a presença de água em dutos flexíveis por meio da variação das contagens por minuto [19].

Mais recentemente, a primeira versão do sistema de inspeção utilizando a técnica de transmissão de raios gama foi testada em amostra de dutos flexíveis, e as leituras obtidas foram capazes de diferenciar as amostras secas das alagadas, qualificando o equipamento para detecção de alagamento no anular de dutos flexíveis. A demonstração do protótipo em um ambiente relevante coloca a tecnologia no TRL 6.

II. Confiabilidade:

Os dados coletados do intervalo de tempo que cada sensor leva para completar as contagens são acumulados, e os valores são comparados para a condição de anular seco e alagado.

A técnica de transmissão gama oferece alta precisão na detecção de alagamentos, fornecendo um diagnóstico com pelo menos 95% de confiança [18].

III. Monitoramento Contínuo vs. Inspeção Pontual:

A técnica pode ser aplicada para inspeções pontuais, onde a fonte e o detector de radiação são posicionados em locais específicos para avaliar a condição do duto naquele ponto e momento, mas não é ideal para monitoramento uma vez que a leitura está condicionada ao acoplamento do equipamento ao redor do riser por um ROV.

Apesar disso, como a fonte radioativa é encapsulada, o equipamento de inspeção desenvolvido tem como vantagem o fato de que pode ser utilizado para inspecionar o duto em grandes profundidades, sem que seu funcionamento seja prejudicado pela elevada pressão do ambiente [18].

IV. Intrusividade:

Diferente das duas técnicas mencionadas anteriormente, a inspeção por raios gama é uma técnica de inspeção não intrusiva que pode ser usada em qualquer riser, sem a necessidade de modificações físicas.

V. Capacidade de Localização do Alagamento:

A inspeção com raios gama fornece a condição do anular nos pontos específicos em que foi acoplado ao riser. Para mapear extensões maiores do duto, múltiplas medições em diferentes posições são necessárias

VI. Custos e Viabilidade Econômica:

Para a técnica de raios gama, nenhuma adaptação ao riser precisa ser feita durante a sua fabricação. Assim, os custos dessa inspeção estão relacionados à fabricação do equipamento de inspeção e ao uso de um ROV para acoplar a ferramenta ao riser. O equipamento de inspeção representa um custo significativo nesse caso, uma vez que depende de radiação ionizante e exige também uma estrutura para encapsular a fonte radioativa [18].

3.4 RESULTADOS COMPARATIVOS

A comparação entre as técnicas de inspeção avaliadas nesse estudo foi embasada nos critérios previamente detalhados na Seção 3.

A maturidade tecnológica foi avaliada com base na escala TRL (Technology Readiness Level), considerando a fase de desenvolvimento, validação em laboratório ou em campo, e a aplicação prática da tecnologia.

Para determinar a confiabilidade de cada sistema foi analisada a precisão dos resultados de testes e aplicações de cada técnica, levando em conta fatores como a sensibilidade de detectar alagamentos, a taxa de detecção e a precisão dos resultados obtidos, por exemplo.

O critério de monitoramento contínuo versus inspeção pontual avaliou a adequação de cada técnica para aplicações permanentes (monitoramento contínuo) ou para intervenções específicas (inspeção pontual).

O critério de intrusividade foi utilizado para avaliar a facilidade com a qual cada técnica pode ser adaptada a risers já instalados.

A capacidade de localização do alagamento varia de acordo com a forma como cada técnica coleta os dados.

Por fim, a viabilidade econômica avaliou os custos associados a cada técnica de inspeção, se são necessárias adaptações ao riser e equipamentos auxiliares, como ROV.

Mediante o exposto, é possível comparar cada técnica de inspeção, colocando cada critério comparativo adotado condensados no Quadro 1.:

Quadro 1: Comparação entre tecnologias de inspeção

Critérios	DTS (Sensor de Distribuição de Temperatura)	RFID (Radiofrequência)	Raios Gama
Maturidade Tecnológica	<p>Esta tecnologia já foi aplicada para inspeção em campo, colocando-a no TRL 8.</p> <p>Dentre as técnicas analisadas, o DTS é a tecnologia de maior maturidade tecnológica.</p>	<p>A tecnologia passou por um teste de média escala realizado em ambiente relevante, colocando-a no TRL 5.</p> <p>É a técnica menos desenvolvida, e ainda são necessárias adaptações para que seja aplicável às condições de campo.</p>	<p>A primeira versão do equipamento já foi totalmente desenvolvida e testada em ambiente laboratorial, em um teste com amostras de risers, colocando-a no TRL 6.</p>
Confiabilidade	<p>Os testes e aplicações do DTS apresentaram uma excelente sensibilidade às mínimas variações, indicando alta confiabilidade.</p>	<p>Alta confiabilidade para pequenos standoffs. Porém, o dispositivo precisa ser aprimorado para se adaptar a risers com muitas camadas polimerias na sua região anular.</p>	<p>A técnica de transmissão gama oferece alta precisão na detecção de alagamentos, fornecendo um diagnóstico com pelo menos 95% de confiança [18].</p>
Monitoramento Contínuo vs Inspeção Pontual	<p>Adequado para monitoramento contínuo (instalação permanente), sendo a única das técnicas adaptadas para tal função.</p>	<p>Adequado para inspeção pontual, uma vez que dependem que o dispositivo leitor esteja acoplado próximo ao sensor para realizar a medição.</p>	<p>Adequado para inspeção pontual, uma vez que a inspeção está condicionada ao acoplamento do equipamento ao redor do riser. Apesar disso, o equipamento foi desenvolvido de forma que pode ser usado em grandes profundidades sem que danifique.</p>
Intrusividade	<p>Tecnologia não é adaptável a risers já instalados, sendo essa a maior limitação da tecnologia.</p>	<p>Tecnologia de difícil adaptação a risers instalados.</p>	<p>Única das três técnicas que é capaz de inspecionar qualquer riser já instalado por ser um equipamento acoplado externamente.</p>
Capacidade de Localização de Alagamento	<p>Os dados coletados em campo demonstraram alta resolução espacial, permitindo identificar o tramo em que ocorreu o alagamento.</p>	<p>A localização do alagamento estará condicionada a leitura de um determinado sensor, logo, sua posição pode ser determinada durante a inspeção e, quanto mais sensores, mais pontos podem ser inspecionados para detectar a entrada de água.</p>	<p>Assim como para o RFID, a localização do alagamento está condicionada aos locais em que foram feitas leituras. Porém, por ser externamente acoplado, a leitura pode ser feita em diversos pontos do riser sem qualquer alteração na sua estrutura.</p>

Para avaliar os custos, foi feita uma análise qualitativa das etapas necessárias para aplicar cada técnica de inspeção apresentada no quadro abaixo:

Quadro 2: Comparação entre os custos

DTS (Sensor de Distribuição de Temperatura)	RFID (Radiofrequência)	Raios Gama
Custos de instalação do sistema DTS durante a fabricação do duto	Custos de instalação dos sensores durante a fabricação do duto + Custo reduzido de fabricação do dispositivo de leitura + Custo de um ROV para realizar a inspeção	Custo elevado de fabricação do dispositivo de inspeção por raios gama + Custo de um ROV para realizar a inspeção

Ao comparar as técnicas com base nos critérios acima, é possível fazer um direcionamento do contexto mais adequado para a aplicação de cada uma.

A fibra ótica vem sendo usada em campo para diversas aplicações, consolidando-se como a técnica com o maior nível de maturidade tecnológica. O sistema DTS é o único entre os três abordados capaz de monitorar em tempo real a condição do riser, com os dados fornecidos na cabine de controle de forma automatizada. Como a sua operação não depende de equipamentos adicionais nem mão de obra especializada, os custos estão concentrados na instalação do sistema durante a fabricação do riser, tornando-o a opção de menor custo entre as técnicas analisadas. A maior desvantagem desse sistema é a incapacidade de adaptá-lo para risers já em operação.

Essas características fazem com que o sistema DTS seja a melhor escolha a ser usada em risers ainda em fabricação, permitindo que sejam equipados desde o início com um sistema de monitoramento contínuo.

A inspeção por radiofrequência apresenta vantagens como baixo custo do equipamento e boa precisão em leituras realizadas com pouco standoff. Contudo, a tecnologia ainda necessita de avanços, especialmente para adaptar o dispositivo de leitura, possibilitando seu acoplamento ao riser por meio de um ROV, além de

aprimorar sua capacidade de detecção para atender a um range maior de standoffs. É interessante também investigar a viabilidade de utilizar esse dispositivo para monitoramento contínuo, com a instalação definitiva do leitor ao redor do riser e a coleta de dados em tempo real.

Assim, a radiofrequência é uma tecnologia promissora para a inspeção de alagamento em dutos a serem fabricados, podendo ser também aplicada para monitoramento contínuo de pontos críticos do riser no futuro, mas ainda precisa de desenvolvimento para que possa ser adaptada às condições reais de operação.

Já a técnica de inspeção por raios gama é a única entre as três que pode ser adaptada para risers que estão em operação, visto que o equipamento é acoplado externamente e não é necessária nenhuma adaptação anterior no duto. Ela possui uma excelente resolução e confiabilidade, pode ser usada para inspecionar o duto em grandes profundidades e em diversos pontos ao longo do seu comprimento.

Suas principais limitações são a impossibilidade de uso para monitoramento contínuo e o alto custo operacional, dado que depende de um ROV para acoplar o equipamento ao riser e exige um equipamento especializado, capaz de encapsular a fonte radioativa. Ainda assim, a inspeção por raios gama se destaca como a melhor alternativa para a inspeção de risers já instalados que demandam maior atenção. Considerando que a antecipação do descomissionamento de um duto gera impactos econômicos significativos, o alto custo dessa técnica é justificável para prevenir gastos futuros ainda maiores.

4 CONCLUSÃO

As técnicas discutidas neste trabalho apresentam uma excelente oportunidade de disseminar o uso de dispositivos de inspeção para garantir a integridades dos dutos de petróleo.

Este estudo analisou três técnicas emergentes — Distributed Temperature Sensing (DTS), Identificação por Radiofrequência (RFID) e Raios Gama — com base em seis critérios: maturidade tecnológica, confiabilidade, intrusividade, capacidade de localização, viabilidade econômica e aplicação para monitoramento contínuo ou inspeção pontual.

A técnica de RFID apresentou uma abordagem promissora, com sensores capazes de identificar alagamentos por meio de variações na frequência de ressonância. Apesar disso, seu estágio de maturidade tecnológica (TRL 5) e sua aplicabilidade limitada à inspeção de risers com standoffs limitados fazem dela a alternativa menos viável entre as três opções.

A técnica de Raios Gama, por sua vez, oferece alta precisão na detecção de alagamentos, sendo a única entre as três capaz de realizar inspeções pontuais em risers já instalados, sem a necessidade de modificações estruturais. Apesar disso, a utilização de radiação ionizante que exige equipamentos especializados, somando à dependência de ROV's para a inspeção, geram um custo elevado para a utilização deste dispositivo. Por essa razão, embora seja a única alternativa para dutos em operação, essa tecnologia tende a ser gradualmente substituída por soluções de monitoramento contínuo.

O DTS, por fim, é um sistema de baixo custo e aplicação simples que permite o monitoramento contínuo, fornecendo dados precisos sobre variações de temperatura ao longo do anular. Embora precise ser instalado ainda durante a fabricação, se destaca como a melhor opção para a detecção alagamento no anular dos risers entre as técnicas analisadas.

5 PERSPECTIVAS FUTURAS

As técnicas apresentadas apresentam diferentes características e também diferentes pontos a serem aprimorados.

O dispositivo DTS já é muito utilizado em campo para monitoramento da temperatura ao longo do riser, com uma análise automatizada que pode ser feita de forma instantânea. Essa automação e visualização dos dados pode ser adaptada para a detecção de danos microscópicos na capa externa através entrada de água, possibilitando um diagnóstico instantâneo com alta resolução espacial.

A técnica RFID, apesar de testada e validada em laboratório, apresentou uma considerável redução na capacidade de detectar alagamento quando comparadas as leituras do dispositivo com uma camada polimérica de 10mm e de 20mm, indicando que a distância entre o sensor, ou seja, a camada de tração do riser, e a sua capa externa é um empecilho. Assim, é interessante desenvolver a técnica de modo que seja capaz de detectar alagamento mesmo em dutos de grandes standoffs para atender as demandas do mercado.

Além disso, o dispositivo RFID ainda está em estágio inicial de desenvolvimento, cabendo uma avaliação da possibilidade de adaptar o leitor para que seja instalado de forma definitiva no riser, possibilitando o monitoramento da condição do riser em tempo real.

Para a técnica de inspeção por raios gama, é interessante desenvolver um software que disponha os dados de forma simples, possibilitando a apresentação dos resultados da forma mais rápida possível. Também é essencial realizar testes em condições de campo para consolidar sua maturidade tecnológica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1]. COELHO, P. **ESTUDO DA SUSCEPTIBILIDADE À CORROSÃO SOB TENSÃO EM ATMOSFERA DE H₂S DAS ARMADURAS DE TRAÇÃO DE DUTOS FLEXÍVEIS**. Rio de Janeiro, 2013. Disponível em: [2013DissertacaoPalomaCoelho.pdf \(cefet-rj.br\)](#)
- [2]. MILANEZ, M. **Avaliação da vida útil remanescente através da nova abordagem para análise do dano por fadiga em risers flexíveis**. UFRJ, 2018. Disponível em: https://w1files.solucaoatrio.net.br/atrio/ufri-peno_upl/THESIS/6000012/2018_mestrando_mateus_milanez_20200404011110120.pdf
- [3]. PETROBRAS. **Pré-sal: mergulhe nessa jornada ultraprofunda**. Disponível em: <https://petrobras.com.br/pre-sal#1000m>. Acesso em: 5 jan. 2025.
- [4]. HERRERA, P. **Estudo da resistência ao desgaste da camada Zeta de pressão de risers flexíveis submetidas a tratamento criogênico e nitretação a plasma**. Brasília, 2015. Disponível em: http://www.realp.unb.br/jspui/bitstream/10482/22022/1/2015_PauloHerrera.pdf. Acesso em: 5 jan. 2025
- [5]. AZEVEDO, N. **Comportamento estrutural de carcaça intertravada de dutos flexíveis sob tração**. Dissertação de Mestrado – UFRJ. Rio de Janeiro, 2018. Disponível em: <https://pantheon.ufrj.br/bitstream/11422/12714/1/NathaliaFrancaDeAzevedo-min.pdf>
- [6]. KUHN, M. **DISPOSITIVO DE DETECÇÃO DO ALAGAMENTO DA REGIÃO DO ANULAR DE DUTOS SUBMARINOS FLEXÍVEIS NÃO ADERENTES COM USO DE SENSORES COM IDENTIFICAÇÃO POR RADIOFREQUÊNCIA**. Porto Alegre, 2021. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/234936/001135191.pdf?sequence=1&isAllowed=y> (ufrgs.br)
- [7]. API-17B: Recommended Practice for Flexible Pipe 2014:268.
- [8]. SALAU, E. **ANÁLISE DA INTEGRIDADE EM ARMADURAS DE TRAÇÃO DE DUTOS FLEXÍVEIS COM O EFEITO DE CORROSÃO SOB TENSÃO EM ÁGUA DO MAR**. Rio Grande do Sul, 2019. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/206375/001112774.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

- [9]. NEGREIROS, L. **AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À FADIGA E CORROSÃO-FADIGA DA ARMADURA DE TRAÇÃO DE UM RISER FLEXÍVEL RETIRADO DE OPERAÇÃO**. Dissertação de Pós-Graduação – UFRGS. Porto Alegre, 2016. Disponível em:
<https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/150496/001007576.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [10]. ERIKSEN, M. et. al. **Outer Cover Damages on Flexible Pipes: Corrosion and Integrity Challenges**. INTERNATIONAL CONFERENCE ON OFFSHORE MECHANICS AND ARCTIC ENGINEERING (OMAE), 33., San Francisco, 2014.
- [11]. FELIX-HENRY A. et al. **Distributed Temperature Monitoring of Flexible Risers**. Disponível em <https://pt.scribd.com/document/319544166/Distributed-Temperature-Monitoring-of-Flexible-Risers>
- [12]. WEPPEAAR, N. et al. **Full-Scale Testing of Distributed Temperature Sensing in Flexible Risers and Flowlines**. 2013.
- [13]. GASPARETTO, V. **MÉTODO DE AVALIAÇÃO DA VIDA À FADIGA DE RISERS FLEXÍVEIS ATRAVÉS DO MONITORAMENTO DAS DEFORMAÇÕES DOS ARAMES DA ARMADURA DE TRAÇÃO**. Rio de Janeiro, 2017. Disponível em:
<https://pantheon.ufrj.br/bitstream/11422/7106/1/865746.pdf>
- [14]. SANGHERA, P. et al. **Deploying and Securing RFID book**. Burlington: Syngress Publishing, Inc., 2007.
- [15]. YI, X. et al. **Passive wireless smart-skin sensor using RFID-based folded patch antennas**. International Journal of Smart and Nano Materials, 2011.
- [16]. ZHANG, J. et al. **UHF RFID Tag Antenna-Based Sensing for Corrosion Detection & Characterization Using Principal Component Analysis**. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2016.
- [17]. KUHN, M. et. Al. **Preliminary Study of an Underwater Wireless Sensor Designed for Interrogating the Environmental Condition of Flexible Pipe Annulus**. Journal of Nondestructive Evaluation, 2019.
- [18]. FERREIRA, C. et al. **DISPOSITIVO, CONJUNTO E MÉTODO DE DETECÇÃO DE ALAGAMENTO DE ANULAR COM TRANSMISSÃO GAMA EM UM DUTO FLEXÍVEL**. Fascículo de patente de invenção BR [PT 2020181349B]. 2020. Disponível em:

<https://patentimages.storage.googleapis.com/99/b0/e6/b1db4693a6dae8/PT2020181349B.pdf>

[19]. **DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE INSPEÇÃO BASEADO EM TRANSMISSÃO DA RADIAÇÃO GAMA PARA APLICAÇÃO EM DUTOS FLEXÍVEIS E COLUNAS INDUSTRIAIS.**

http://antigo.nuclear.ufrj.br/MSc%20Dissertacoes/Clerio/dissertacao_clerio.pdf

[20]. MARINHO, C. et al. **Annulus flooding detection system in flexible pipes using gamma rays transmission technique.** 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0969804322000768>

[21]. PALACIOS, C.A. et al. **Characteristics of Corrosion Scales on Steels in a CO₂-saturated NaCl Brine**, Corrosion, Vol. 47, 1991, p.122.

[22]. ALAMIN, M. et al. **Corrosion detection using low-frequency RFID technology.** Inglaterra, 2011.

[23]. ANDRADE, D. **Corrosão-Fadiga nas Armaduras de Tração de um Riser Flexível do Tipo Unbonded.** Minas Gerais, 2018. Disponível em: <http://repositorio.unis.edu.br/bitstream/prefix/574/1/DAYANE-%20TCC%20ENGENHARIA.pdf#:~:text=7%20FALHAS%20EM%20DUTOS%20FLEX%C3%8DVEIS.%20A%20norma,apresentados%20pela%20mesma%20norma%2C%20que%20s%C3%A3o%20pr%C3%B3rios>

[24]. BENDIA, N. **Avaliação de Danos em Linhas Flexíveis uma Visão Prática.** Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Engenharia Naval e Oceânica) - UFRJ. Rio de Janeiro. 2019.

[25]. BERGE, S. et. al. **Surface Characterization and Fatigue Strength of Corroded Armor Wire.** INTERNATIONAL CONFERENCE ON OFFSHORE MECHANICS AND ARCTIC ENGINEERING (OMAE), 33., San Francisco, 2014.

[26]. BORGES, M. **Correlação numérica-experimental da redução da vida em fadiga de dutos flexíveis operando com anular alagado na presença de CO₂.** 2017. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, [s. l.], 2017. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/172110/001055547.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

- [27]. CLARKE, T. **SISTEMA E MÉTODO PARA DETECÇÃO DE INGRESSO DE LIQUIDOS E PERMEACÃO DE GASES ENTRE AS CAMADAS DE UMA TUBULAÇÃO OU CABO SUBMARINO FLEXÍVEL MULTICAMADAS, BASEADO EM SENSORES MAGNETOELÁSTICOS.** 2018. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/174324/001064450.pdf?sequence=1>
- [28]. FREIRE, J. **Engenharia de Dutos**, Cap 17.
- [29]. GLOVER, B.; BHATT, H. **RFID essentials**. Sebastopol: O'Reilly Media, Inc., 2006.
- [30]. Journal of Petroleum Technology: **Best practices for flexible pipe integrity. Evolve.** Disponível em: <https://jpt.spe.org/best-practices-flexible-pipe-integrity-evolve>. Acesso em: 3 jan. 2025
- [31]. Journal of Petroleum Technology; **Testing of Distributed-Temperature Sensing in Flexible Risers and Flowlines.** 2014. Acesso em: 3 jan. 2025
- [32]. ZARIFI, M.et. al. **Wireless passive RFID sensor for pipeline integrity monitoring. Sensors and Actuators, A: Physical,** Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0924424716305714?via%3Dihub>