

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

ESCOLA DE ENGENHARIA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS, METALÚRGICA  
E DE MATERIAIS - PPGE3M

DISPOSITIVO DE DETECÇÃO DO ALAGAMENTO DA REGIÃO DO ANULAR DE  
DUTOS SUBMARINOS FLEXÍVEIS NÃO ADERENTES COM USO DE SENSORES  
COM IDENTIFICAÇÃO POR RADIOFREQUÊNCIA

Matheus Freitas Kuhn

Tese de Doutorado

Porto Alegre

2021

MATHEUS FREITAS KUHN

DISPOSITIVO DE DETECÇÃO DO ALAGAMENTO DA REGIÃO DO ANULAR DE  
DUTOS SUBMARINOS FLEXÍVEIS NÃO ADERENTES COM USO DE SENSORES  
COM IDENTIFICAÇÃO POR RADIOFREQUÊNCIA

Tese submetida ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Materiais, Minas e Metalúrgica – PPGEM da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Thomas G. R. Clarke

Porto Alegre

2021

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Reitor: Carlos André Bulhões

Vice-reitora: Patrícia Pranke

ESCOLA DE ENGENHARIA

Diretora: Carla Schwengber Ten Caten

Vice-diretor: Afonso Reguly

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS, METALÚRGICA  
E DE MATERIAIS - PPGE3M

Coordenador: Afonso Reguly

Vice-coordenadora: Andréa Moura Bernardes

Kuhn, Matheus Freitas

DISPOSITIVO DE DETECÇÃO DO ALAGAMENTO DA  
REGIÃO DO ANULAR DE DUTOS SUBMARINOS FLEXÍVEIS  
NÃO ADERENTES COM USO DE SENSORES COM  
IDENTIFICAÇÃO POR RADIOFREQUÊNCIA. / Matheus Freitas  
Kuhn. – 2021.

100 f.

Orientador: Thomas Gabriel Rosauo Clarke.

Tese (Doutorado) -- Universidade Federal do Rio Grande do Sul,  
Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de  
Minas, Metalúrgica e de Materiais, Porto Alegre, BR-RS, 2021.

1. Dutos Flexíveis. 2. Inspeção 3. Dispositivo. 4. RFID 5. Simulação  
numérica. I. Clarke, Thomas Gabriel Rosauo, orient. II. Título.

MATHEUS FREITAS KUHN

DISPOSITIVO DE DETECÇÃO DO ALAGAMENTO DA REGIÃO DO ANULAR DE DUTOS SUBMARINOS FLEXÍVEIS NÃO ADERENTES COM USO DE SENSORES COM IDENTIFICAÇÃO POR RADIOFREQUÊNCIA

Esta tese foi analisada e julgada adequada para a obtenção do título de Doutor em Engenharia, área de concentração em Ciência e Tecnologia dos Materiais, e aprovado em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora designada pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais (PPGE3M) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

---

Prof. Dr. Thomas Gabriel Rosauo Clarke – Prof. Orientador

---

Prof. Dr. Afonso Reguly – Coordenador PPGE3M

Aprovado em: 08/09/2021

BANCA EXAMINADORA

Dr. Guilherme Petry Breier

Dr. Toni Roger Schifelhain de Lima

Prof. Dr. Marcelo Favaro Borges

\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que de alguma forma contribuíram na construção desta tese, aos colegas de pesquisa em especial, que compartilham dos mesmos desafios e adversidades, nunca desistindo de seus objetivos.

Agradeço aos meus pais, Valdair Gabriel Kuhn e Ricarda Freitas Kuhn, pelo apoio e amor incondicional. À Kelli Silveira dos Santos, minha namorada, pelo companheirismo e afeto. Aos demais familiares que sempre incentivaram meus estudos e a busca pelo conhecimento.

Agradeço à Universidade Federal do Rio Grande do Sul por proporcionar a possibilidade de realização deste doutorado e por fornecer conhecimento com excelência. Em especial ao Laboratório de Metalurgia Física – LAMEF, que sempre se mostrou disposto a encarar novos desafios em diversas áreas da tecnologia. Além disso, sempre forneceu toda a infraestrutura necessária para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Thomas Gabriel Rosauero Clarke, o qual participou da elaboração desta tese e norteou a condução desta pesquisa à medida que empecilhos iam surgindo.

## RESUMO

O ingresso de água do mar na região anular de dutos flexíveis pode ocorrer devido à ruptura da camada externa isolante ou pela permeação de vapor d'água a partir do interior do duto. Este evento causa significativa redução no tempo de operação do duto, principalmente pelo ambiente corrosivo que é formado. Associado a isso, a permeação de gases provindos do produto de exploração, em conjunto com a condição de anular alagado, leva à geração de mecanismos de falha como corrosão fadiga e fragilização induzida pelo hidrogênio. Uma vez que o espaço do anular dos dutos flexíveis é alagado, diversos modos de falha assistidos por corrosão podem se desenvolver e, assim, um dispositivo capaz de detectar com segurança a presença da água na estrutura é altamente desejável. Este trabalho tem por objetivo desenvolver um dispositivo capaz de detectar o alagamento do anular de dutos flexíveis com o uso de sensores com identificação por radiofrequência. Foram produzidos sensores, especialmente para a aplicação entre as camadas de dutos flexíveis e com frequência de ressonância específica. O mecanismo de detecção da alteração da condição do anular é baseado na variação de frequência de ressonância do sensor. Foram projetados e validados um conjunto de sensores e um leitor, por meio do método dos elementos finitos e de uma etapa experimental. Na etapa experimental os sensores foram instalados interior das camadas de um segmento de duto flexível, bem como foi realizada a simulação das condições de alagamento com água do mar sintética. A influência de parâmetros externos na frequência de ressonância foi mensurada, tais como a variação da temperatura do meio, a inclinação e a excentricidade entre a bobina leitora e o sensor. Os resultados comprovaram a capacidade de o dispositivo detectar o alagamento de dutos flexíveis. Reduções de valores de frequência de ressonância de até 1,25 MHz foram verificadas. Os efeitos do aumento da temperatura do meio, da inclinação e da excentricidade das bobinas podem ser negligenciados.

Palavras chave – RFID, Sensor, Dutos Flexíveis, Anular alagado, Detecção de líquidos.

## ABSTRACT

The ingress of seawater into the annular region of flexible pipes can occur due to the rupture of the external insulating layer or by the permeation of water vapor from the interior of the pipe. This event causes a significant reduction in the pipeline's operating time, mainly due to the corrosive environment that is formed. Associated with this, the permeation of gases coming from the exploration product, together with the annular flooded condition, leads to the generation of failure mechanisms such as fatigue corrosion and hydrogen-induced embrittlement. Since the annular space of flexible pipes is flooded, several corrosion assisted failure modes can develop and thus a device capable of reliably detecting the presence of water in the structure is highly desirable. This work aims to develop a device capable of detecting the flooding of the annular of flexible pipes using sensors with radio frequency identification. Sensors were produced, especially for application between layers of flexible pipes and with a specific resonance frequency. The mechanism for detecting the change in the condition of the ring is based on the resonant frequency variation of the sensor. A set of sensors and a reader were designed and validated using the finite element method and an experimental stage. In the experimental stage, the sensors were installed inside the layers of a flexible pipeline segment, and the flood conditions were simulated with synthetic seawater. The influence of external parameters on the resonance frequency was measured, such as the variation in the temperature of the medium, the inclination and the eccentricity between the reader coil and the sensor. The results proved the device's ability to detect flooding in flexible pipes. Reductions of resonant frequency values of up to 1.25 MHz were verified. The effects of increasing the temperature of the medium, inclination and eccentricity of the coils can be neglected.

Keywords – RFID, Sensor, Flexible Pipes, Annular flooded, Liquid detection.

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Principais camadas estruturais de um duto flexível. ....	22
Figura 2 – Corte longitudinal de um duto flexível e em vermelho a região do anular deste duto. ....	24
Figura 3 – Principais falhas em dutos flexíveis .....	26
Figura 4 – Mecanismo externo(preto) e interno(vermelho) de ingresso de água e gases na região do anular. ....	27
Figura 5 – Componentes típicos de um dispositivo RFID. ....	30
Figura 6 – Princípio de operação por acoplamento indutivo. ....	32
Figura 7 – Correlação entre a intensidade do campo magnético, o raio do leitor e a distância entre a bobina do leitor e a bobina do sensor. ....	33
Figura 8 – Comportamento do fator de acoplamento com o aumento da distância, $x_d$ , para diferentes relações entre o raio da bobina leitora e do sensor. ....	36
Figura 9 – Comportamento do coeficiente de acoplamento com a distância de leitura para diferentes valores do raio de projeto. ....	36
Figura 10 – Circuito elétrico do dispositivo leitor/sensor. ....	37
Figura 11 – Mecanismo de detecção de alteração de meio. a) Capacitores gerados entre os condutores. b) Campo elétrico gerado entre os condutores e o efeito de frangeamento do campo elétrico. ....	38
Figura 12 – Definição da Frequência de Ressonância através do Parâmetro S11 .....	40
Figura 13 – Linhas de Fluxo Magnético em um Material Ferromagnético. a) Aplicação sem metal posicionado atrás do sensor. b) Aplicação com metal posicionado atrás do sensor e geração de campo magnético secundário. c) Aplicação de ferrite e redução do campo magnético secundário devido ao direcionamento das linha de fluxo. ....	42
Figura 14 - Crescente aumento de publicações de sensores RFID. ....	45
Figura 15 – Valores da frequência de ressonância em função da distância quando exposto em meio ao ar e a água. ....	47
Figura 16 – Fluxograma das atividades desenvolvidas neste trabalho. ....	48
Figura 17 – Correlações entre intensidade de campo magnético, fator de acoplamento e distância entre bobinas para determinação do raio do sensor. ....	49
Figura 18 – Características geométricas do modelo numérico. ....	52
Figura 19 – a) Geometria Bobina Leitor; b) Geometria Bobina Sensor. ....	53
Figura 20 – a) Prototipadora; b) Placa de aquisição NI PXIe-5630. ....	54
Figura 21 - a) Leitor comercial RFID; b) Leitor RFID resinado. ....	54
Figura 22- Configuração ensaio em escala laboratorial. ....	56
Figura 23 – a) Segmento de duto flexível; b) Sensores resistivos; c) Posicionamento do sensor. ....	57
Figura 24 – Posicionamento dos sensores no segmento de duto flexível. ....	58
Figura 25 – Metodologia do ensaio. ....	58
Figura 26 – Ensaio em escala média. ....	59
Figura 27 – Interface do software de aquisição de sinais. ....	60
Figura 28 – Câmara Climática utilizada nos ensaios de variação de temperatura. ....	61
Figura 29 - <i>Setup</i> desalinhamento entre bobina sensora e bobina leitora. ....	61

Figura 30 – Esquemático do ensaio da influência da inclinação do leitor. a) Posicionamento entre o leitor e sensor. b) Geometrias das sapatas aplicadas. ....	62
Figura 31 – Teste de convergência de malha – Número de elementos. ....	63
Figura 32 – Teste de convergência de malha – Tamanho do elemento. ....	64
Figura 33 – Comportamento do Parâmetro $S_{11}$ com a variação da distância entre as trilhas do sensor. ....	64
Figura 34 – Comportamento da variação da frequência de ressonância em função da espessura do revestimento aplicado sobre o sensor. ....	65
Figura 35 – Efeito da proximidade de uma superfície metálica e o uso do Ferrite. ....	66
Figura 36 – Parâmetro $S_{11}$ em função da condutividade da água. ....	67
Figura 37 – Comportamento da Frequência de Ressonância em função da espessura da camada de água na região superior do sensor. ....	68
Figura 38 – Resultados numéricos para o parâmetro $S_{11}$ para condição de anular seco e anular alagado. ....	69
Figura 39 – Densidade e vetores de campo magnético obtidos no modelo numérico. ....	69
Figura 40 – Parâmetro $S_{11}$ para condição do sensor com revestimento. a) anular seco. b) Anular alagado. ....	70
Figura 41 – Parâmetro $S_{11}$ para condição do sensor sem revestimento. a) anular seco. b) Anular alagado. ....	71
Figura 42 – Resultado experimental sensor ID 2049021188. a) Condição anular seco. b) Condição anular alagado. ....	72
Figura 43 – Resultado experimental sensor ID 2049019396. a) Condição anular seco. b) Condição anular alagado. ....	73
Figura 44 – Resultado experimental sensor ID 2049021444. a) Condição anular seco. b) Condição anular alagado. ....	74
Figura 45 – Resultado experimental sensor ID 2049020932 a) Condição anular seco. b) Condição anular alagado. ....	75
Figura 46 – Ensaio 1, sensor ID 2049022468, análise de frequência em função do tempo. ....	77
Figura 47 – Comportamento da frequência de ressonância em função do tempo para o sensor ID 2049022468. Os círculos em vermelho indicam o momento do contato entre água externa ao duto e o leitor. As setas em branco apontam o instante do início do alagamento. ....	78
Figura 48 – Frequência de ressonância em função do tempo para diferentes temperaturas e com o sensor sem revestimento. ....	80
Figura 49 – Correlação da frequência de ressonância do sensor e a temperatura para o sensor sem revestimento. ....	80
Figura 50 – Frequência de ressonância em função do tempo para diferentes temperaturas e com o sensor com revestimento. ....	81
Figura 51 – Correlação da frequência de ressonância do sensor e a temperatura para o sensor com revestimento. ....	81
Figura 52 - Comparação entre resultados de 2020 e 2021. ....	83
Figura 53 – Correlação do parâmetro $S_{11}$ com a frequência e o tempo. Figura 53 – a) Sensor 2049022468; Figura 53 – b) Sensor 2049020420; Figura 53 – c) Sensor 2049020932. ....	84
Figura 54 – Resposta baseada na frequência de ressonância em função do tempo. ....	85
Figura 55 – Influência da inclinação da bobina leitora no parâmetro $S_{11}$ . ....	86

Figura 56 – Sensores após 1 ano inseridos. a) ID – 2049020676; b)ID – 2049021188; c) ID – 2049021444; d) ID – 2049022468; e)ID – 2049020932; f) ID – 2049020420; g) ID – 2049022212; h) ID – 2049019396..... 89

Figura 57 – Imagem ampliada do CIs. a) 2049021188; b)2049021444; c)2049022212. .... 90

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Principais causas de falha para as respectivas camadas estruturais de dutos flexíveis. ....	25
Tabela 2 – Técnicas de inspeção aplicadas em dutos flexíveis. ....	28
Tabela 3 – Comparativos entre bandas de frequência de dispositivo RFID. ....	30
Tabela 4 – Parâmetros geométricos e ambientais estudados. ....	50
Tabela 5 – Propriedades dos materiais utilizados no modelo numérico. ....	51
Tabela 6 – Frequência de Ressonância e Amplitude $S_{11}$ em função da condutividade. ....	67
Tabela 7 – Parâmetros Geométricos para o conjunto Leitor/Sensor. ....	68
Tabela 8 – Média, desvio padrão e variação de frequência de ressonância para cada sensor. ....	75
Tabela 9 - Comparativo entre resultados obtidos por outros trabalhos semelhantes. ....	79
Tabela 10 - Dados experimentos 2021. ....	82
Tabela 11 – Dados para inclinações da bobina leitora. ....	86
Tabela 12 – Excentricidade entre bobinas Sensor 2049019396 . ....	87
Tabela 13 - Dados análise de falha ....	89

## LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

AISI	American Iron and Steel Institute
HDPE	High-density polyethylene
PVDF	Fluoreto de polivinilideno
CENPES	Centro de pesquisas Leopoldo Américo Miguez de Mello
PROCAP	Programa de capacitação tecnológica em águas profundas
RFID	Identificação por Radiofrequência
GHz	Gigahertz
MHz	Megahertz
kHz	Quilohertz
Hz	Hertz
LF	Low Frequency
HF	High Frequency
UHF	Ultra High Frequency
m	metro
cm	centímetro
mm	milímetro
ISO	International Organization for Standardization
C	Coulomb
Wb	Weber
s	segundo
N	Newton
S	Siemens
F	Faraday
H	Henry
DUT	Dispositivo em Teste
MEF	Método dos Elementos Finitos
CNC	Comando Numérico Computadorizado
RF	Radiofrequência
SMA	SubMiniature version A
ASTM	American Society for Testing and Materials
°C	grau Celsius
dB	decibel
ID	Identificação
S <sub>11</sub>	Parâmetro de Espalhamento de Reflexão na Porta 1

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	15
1.1 Objetivo Geral.....	17
1.2 Objetivos Específicos.....	17
1.3 Justificativa .....	17
1.4 Método de pesquisa.....	18
1.5 Delimitações da Pesquisa.....	19
1.6 Publicações geradas pela tese .....	19
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	21
2.1 Dutos Flexíveis .....	21
2.1.1 Conceitos .....	21
2.1.2 Modos de Falha em Dutos Flexíveis .....	25
2.1.3 Condição de Anular Alagado.....	27
2.1.4 Métodos de Inspeção para o Alagamento do Anular .....	28
2.2 Identificação por Radiofrequência - RFID.....	29
2.2.1 Dispositivos de Identificação por Radiofrequência. ....	29
2.3 Princípios Físicos de Dispositivos RFID .....	32
2.3.1 Fundamentos do Eletromagnetismo .....	32
2.3.2 Circuito Elétrico e a Frequência de Ressonância .....	37
2.3.3 Profundidade de Penetração e Atenuação.....	40
2.3.4 A Proximidade do Metal e a Blindagem Magnética.....	41
2.4 O Estado da Arte para Sensores Ressonantes .....	43
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	48
3.1 Projeto do Conjunto Leitor/Sensor .....	48
3.1.1 Geometria .....	48
3.1.2 Projeto Geométrico Assistido pelo Método dos Elementos Finitos.....	50
3.2 Equipamentos e Materiais .....	53
3.3 Ensaio Experimental .....	55
3.3.1 Ensaio em Escala Laboratorial.....	56
3.3.2 Ensaio em Escala Média.....	57
3.3.3 Ensaio da Influência da Temperatura .....	60
3.3.4 Ensaio da Influência da Excentricidade entre o Sensor e o Leitor .....	61
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	63

4.1 Método dos Elementos Finitos.....	63
4.2 Ensaios em Escala Laboratorial.....	69
4.3 Ensaios em Escala Média.....	71
4.4 Ensaios de Temperatura.....	79
4.5 Ensaio em Escala Média Após Um Ano da Inserção dos Sensores.....	82
4.6 O Efeito da Inclinação da Bobina Leitora em Relação ao Sensor. ....	85
4.7 O Efeito da Excentricidade da Bobina Leitora em Relação ao Sensor. ....	86
4.8 Análise de Falha.....	87
5. CONCLUSÃO.....	91
6. TRABALHOS FUTUROS.....	93
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	94

## 1. INTRODUÇÃO

As recentes descobertas de reservas de petróleo em regiões de maior profundidade oceânica trouxeram consigo desafios para a sua exploração, transporte e produção. O emprego de dutos flexíveis nessas novas reservas tornou-se uma atrativa alternativa, uma vez que permitem a instalação com agilidade e por possuírem resistência mecânica adequada para suportar os esforços mecânicos durante toda a operação (XAVIER, 2009). Sua estrutura formada por multicamadas não aderentes é projetada de modo que cada elemento desempenhe uma função específica para a sua integridade. A falha catastrófica destes dutos está atrelada a perdas financeiras e impactos ambientais irreparáveis. Assim, assegurar informações da integridade estrutural destes dutos flexíveis através de métodos de inspeção é um dos desafios atuais da engenharia (MINERALS MANAGEMENT SERVICE, 2000).

A região dos dutos flexíveis compreendida entre a camada externa de vedação e a barreira de vedação interna é conhecida como a região do anular e nela estão presentes elementos essenciais para a integridade da estrutura, tais como as armaduras de tração e pressão. Esta região é preenchida com ar atmosférico durante seu processo de fabricação e isolada em relação ao ambiente externo e interno do duto e, assim, durante sua operação ela estaria, em tese, isolada e protegida de contato com outras substâncias. No entanto, durante a instalação e operação dos dutos flexíveis ocorre a geração de defeitos e falhas nestas barreiras de vedação, havendo ingresso de água no espaço do anular. Recentes estudos apontam que o ingresso da água na região do anular de dutos flexíveis é sua principal causa de falha (BOSCHEE, 2012). Isso se deve ao fato de a presença de água favorecer o processo de corrosão e degradar as propriedades mecânicas das estruturas metálicas. Outro fator é a combinação da água e subprodutos do processo de exploração, como  $H_2S$  e  $CO_2$ , levando à intensificação do processo de corrosão das estruturas metálicas e levando a mecanismos de falha, como corrosão-fatiga, corrosão sob tensão e trincamento induzido pelo hidrogênio.

A dificuldade na inspeção dos dutos flexíveis deve-se ao fato de estes operarem em grandes profundidades de lâmina d'água e ainda possuírem geometrias complexas e formadas por multicamadas. Porém, a informação da condição do anular destes dutos flexíveis é fundamental para o gerenciamento da estrutura, pois a severidade do processo de corrosão está diretamente ligada à presença de água na região do anular. Diversos métodos para detecção de alagamento estão em fase de teste, e a inspeção visual é o método mais comum. Entretanto, a determinação do alagamento do anular baseado em inspeção visual pode levar a conclusões errôneas. Logo, um dispositivo complementar, capaz de detectar o alagamento do anular por meio de técnicas de radiofrequência, é necessário e contribuirá de forma significativa na tomada de decisão dos gestores e fomentará discussões sobre a aplicabilidade de dispositivos de radiofrequência na inspeção de estruturas subaquáticas na comunidade científica.

Os desafios da aplicação deste dispositivo são enormes, desde a inserção dos sensores durante o processo fabricação dos dutos flexíveis, requalificação destes dutos com sensores inseridos e marinização para grandes profundidades de toda a eletrônica necessária. Além disso, é necessário o desenvolvimento de uma ferramenta para ROV que conduza o sistema de leitura

do sinal até o duto flexível. No entanto, todos estes processos se justificam pelo resultado de se obter uma operação com mais segurança e com menos riscos ambientais.

O uso da tecnologia de identificação por radiofrequência (RFID) possibilita a aplicação de uma matriz de sensores ao longo da estrutura. Um dispositivo que opere em alta frequência permite a construção de sensores flexíveis, de espessura reduzida, que operem de forma passiva e não necessitem de interação química ou contato elétrico para detecção do alagamento. Dessa forma, esta tese irá investigar o potencial uso de um dispositivo de detecção do alagamento de dutos flexíveis não aderentes com o uso de radiofrequência.

## 1.1 Objetivo Geral

O presente trabalho tem como objetivo geral desenvolver um dispositivo de monitoramento da condição, alagado ou seco, do anular de dutos flexíveis, que opere na banda de alta frequência e com o uso da tecnologia de RFID.

## 1.2 Objetivos Específicos

- Desenvolver protótipo de sensor flexível de espessura reduzida que possa ser inserido entre as camadas do duto flexível;
- Desenvolver protótipo da unidade leitora;
- Comprovar a capacidade de detecção da presença de água na região do anular com uso do dispositivo proposto em um segmento de duto flexível;
- Comprovar a funcionalidade do sensor em fornecer seus dados de identificação.
- Verificar a influência da temperatura, da excentricidade e da inclinação entre o sensor e a unidade leitora sobre a resposta do dispositivo.

## 1.3 Justificativa

O tema deste trabalho foi escolhido devido à necessidade de se desenvolver uma nova ferramenta para auxiliar a gestão da integridade de dutos flexíveis, agregando mais segurança e confiabilidade na operação. Além disso, o Brasil é um dos principais usuários destes tipos de dutos flexíveis e a operação da extração de petróleo envolve altos riscos econômicos, humanos e ambientais, de modo que mitigá-los é essencial (MARINHO; DOS SANTOS; CARNEVAL, 2006).

O uso da identificação por radiofrequência vem se intensificando nas últimas décadas. A redução do custo de produção de seus componentes levou à popularização de dispositivos com o uso do RFID. Aplicações mais diversas, desde cartões de acesso até sensoriamento, são verificadas e estudadas (STEPHEN B, Miles et al. 2008). O Brasil é o único país da América Latina com uma empresa capaz de fabricar componentes eletrônicos de silício.

As reservas de petróleo do Brasil são vastas e o uso de dutos flexíveis pode continuar por muitas décadas até a substituição por outro tipo de tubulação (ABGP, 2021). O impacto ecológico e financeiro da operação, por si só, justifica qualquer custo de implementação deste dispositivo de detecção em linhas de operação. Sensores fabricados a baixíssimos custos podem ser aplicados ao longo de vários segmentos destas tubulações.

Na revisão bibliográfica, constatou-se que estudos com aplicações de sensoriamento com o uso de identificação por radiofrequência vêm crescendo (ZHANG et al., 2017). Além disso, a detecção de umidade por estes sensores já é comprovada (Zarifi, Deif e Daneshmand, 2017). Logo, por que não desenvolver um dispositivo dedicado à detecção do alagamento em dutos flexíveis?

Assim, mesmo que por um lado exista o desafio das incertezas sobre a implementação desta tecnologia, por outro, temos o entusiasmo e a excitação pelo desenvolvimento de uma aplicação inédita, no interior de dutos flexíveis, para a tecnologia de RFID.

#### 1.4 Método de pesquisa

Das diversas classificações dos métodos de pesquisa, podemos iniciar pela natureza da pesquisa, e esta pode ser classificada como uma pesquisa aplicada, pois é direcionada para a solução de um problema específico, qual seja, a detecção da presença de água no anular de dutos flexíveis.

Como objetivos da pesquisa podemos destacar o método de pesquisa de caráter exploratória e o método de pesquisa de caráter experimental. O primeiro visando o levantamento bibliográfico e de hipóteses pertinentes e o outro com a finalidade de identificar fatores influentes sobre o fenômeno. Cabe salientar que a pesquisa é um processo permanentemente inacabado e responsável por fornecer subsídios para uma intervenção na prática (GERHARDT,2009).

A proposta desta tese, de desenvolver um dispositivo capaz de detectar a presença da água na região do anular de forma *wireless* e sem contato elétrico com os fluidos internos, surgiu devido à expertise do LAMEF UFRGS em analisar dutos flexíveis e ao conhecimento dos problemas gerados pela presença de água dentro da região do anular.

A partir disso, foi iniciada uma pesquisa com o uso do método de caráter exploratório, buscando-se sensores que atendessem o critério de detecção de umidade ou líquidos. Nesta etapa, uma consolidada revisão foi realizada e surgiu a possibilidade de utilização dos sensores indutivos LC. Porém, também surgiram os empecilhos a serem contornados para a sua aplicação, como a estrutura metálica de arames e a pequena espessura do sensor. Nesta revisão foram utilizados artigos do ano de 2000 até o ano de 2020 e realizado o levantamento de equipamentos e insumos necessários para a produção deste trabalho.

Uma vez explorados artigos e teses, foi possível definir quais materiais deveriam ser comprados ou aplicados para a fabricação e a confecção dos sensores. Além disso, foi verificado se existia a disponibilidade de *software* para simulação computacional do dispositivo. Desta forma, a pesquisa exploratória forneceu uma maior contextualização dos desafios desta tese, além de situar o trabalho em uma escala tecnológica.

Após definidas as bases da pesquisa, a presença de água no anular pôde ser determinada através de valores numéricos, ou seja, quantificada. Logo, foi iniciada uma abordagem de pesquisa quantitativa, centrada na análise de um parâmetro, que é a frequência de ressonância dos sensores, e focada nos conceitos de coleta de dados e de análise numéricas. Realizando-se, assim, a ruptura do processo de elaboração científica (GERHARDT, 2009).

Munido de informações e capacitado para a realização do experimento, foi iniciada a etapa do método de pesquisa de caráter experimental. Esta é caracterizada pelo controle de diversas variáveis e pela elaboração de instrumentos e procedimentos para coletas de dados.

Nesta tese foram utilizados procedimentos experimentais do tipo “antes e depois”, com um único grupo de sensores.

### 1.5 Delimitações da Pesquisa

Toda a pesquisa que compõe esta tese foi realizada no Laboratório de Metalurgia Física da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, LAMEF-UFRGS, sempre respeitando as regulamentações do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, PPGE3M.

Em relação ao método de pesquisa de caráter exploratória os limites temporais foram de 2000 até 2020. As plataformas utilizadas na pesquisa foram: *Google Scholar e Science Direct*. E nestas plataformas as palavras-chaves utilizadas foram: *Sensor RFID; Environment sensor; LC sensor; coil coupling; flexible pipe; capacitive sensor*. A maioria dos resultados obtidos foram publicações em revistas e periódicos. Alguns livros e teses também foram utilizados.

### 1.6 Publicações geradas pela tese

Além da própria tese, foram geradas as seguintes publicações, depósito de pedido de patente e apresentações em congressos respectivamente:

- Revista: JOURNAL OF NONDESTRUCTIVE EVALUATION – Fator de impacto 1.95 - Revista A1 Qualis(2013-2016) Engenharia II.

Kuhn, M.F., Jacques, R.C. & Clarke, T.G.R. Preliminary Study of an Underwater Wireless Sensor Designed for Interrogating the Environmental Condition of Flexible Pipe Annulus. *J Nondestruct Eval* 38, 60(2019), <https://doi.org/10.1007/s10921-019-0598-1>

- Revista: MARINE STRUCTURES – Fator de impacto 2.70 - Revista A1 Qualis(2013-2016) Engenharia II.

Kuhn, Matheus F., P. Missell Frank, F. Borges Marcelo, G. R. Clarke Thomas, RFID wireless system for detection of water in the annulus of a flexible pipe, *Marine Structures*, Volume 72, 2020, 102776, ISSN 0951-8339, <https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2020.102776>

- Pedido de Patente

KUHN, MATHEUS F.; CLARKE, T. G. R. ; BORGES, M. F. ; BISOGNIN, A. ; OLIVEIRA, H. T. H. Sistema e método de monitoramento de dutos e cabos submarinos flexíveis e processo de confecção. 2019, brasil. Patente: privilégio de inovação. Número do registro: br10201900696, título: "Sistema e método de monitoramento de dutos e cabos submarinos flexíveis e processo de confecção", instituição de registro: INPI - Instituto Nacional da Propriedade Industrial. Depósito: 05/04/2019.

- Apresentações em congressos

KUHN, MATHEUS F.; CLARKE, T. R. . Monitoramento de integridade estrutural (SHM) com sensores sem fio RFID. 2018. ConaEnd&Lev 2018, São Paulo.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Dutos Flexíveis

Esta seção irá abordar e contextualizar o leitor sobre os aspectos estruturais e operacionais de dutos flexíveis. Sua concepção estrutural e funcional, histórico, modos de falha, condições de operação severas e métodos de inspeção serão detalhados para melhor compreensão do desafio e da importância do desenvolvimento deste dispositivo complementar.

#### 2.1.1 Conceitos

Dutos flexíveis de camadas não aderentes são tubulações utilizadas para transporte e injeção de água, óleo, gás e derivados (ALBINO, 2011). Possuem a função principal de interligar os poços produtores às unidades de produção. São baseados em uma estrutura tubular composta de múltiplas camadas concêntricas, não aderidas e sobrepostas (ZHANG et al., 2003). Têm sua aplicação amplamente difundida devido ao fato de possibilitarem a redução do tempo de projeto e instalação, e também por ocuparem espaço reduzido (BERGE et al., 2017). São mais caros que tubos rígidos, porém são vantajosos para aplicação em águas profundas.

Em meados do ano de 2006, aproximadamente 80% da produção brasileira de petróleo e gás era transportada através de dutos flexíveis. Estes dutos formavam uma rede de 5300 km, conectando-se a outras estruturas como plataformas e *manifolds* (MARINHO; DOS SANTOS; CARNEVAL, 2006). No entanto, até esta tecnologia obter um alto grau de confiabilidade e amadurecimento, muito trabalho, pesquisa e desenvolvimento foram realizados.

O primeiro desenvolvimento de dutos flexíveis foi feito pelo Instituto Francês do Petróleo no final da década de 60. Seu projeto inicial baseou-se na construção de uma mangueira de alta pressão para substituir um duto de perfuração e, no fim, tornou-se uma patente de duto flexível nos moldes que conhecemos hoje. A formação de um consórcio entre este instituto, e outros investidores levaram à criação da companhia Coflexip, atual TechnipFMC, que ainda comercializa o conceito de dutos flexíveis na indústria *offshore* (JMU et al., 2013). A primeira instalação de duto para transporte de hidrocarbonetos foi no Congo, para a Companhia ELF, a qual foi um sucesso e levou à fabricação de outras dimensões de dutos e a instalações em outros locais.

No Brasil, a Petrobrás adotou o uso de dutos flexíveis para produção e exploração pela primeira vez em 1979, com a entrada em operação do sistema antecipado de produção anchova leste. A descoberta de campos de produção em lâminas d'água mais profundas inviabilizou o uso de plataformas fixas. Assim, o Centro de pesquisas Leopoldo Américo Miguez de Mello (CENPES) desenvolveu a primeira árvore de natal molhada, sendo instalada em 189 m de lâmina d'água, batendo recordes de profundidade para a época (BORGES, 2017)(DE MATTOS DIAS; QUAGLINO, 1993). Com as novas descobertas, ocorreu a mobilização de diversos pesquisadores, empresas e países no desenvolvimento de tecnologia para as linhas de flexíveis de forma bastante acelerada. Destas mobilizações, iniciou-se o PROCAP – Programa de

Capacitação Tecnológica em águas profundas, gerando diversos projetos bem-sucedidos e levando a Petrobras a um título de líder mundial em tecnologia de exploração e produção de petróleo em águas profundas e ultra profundas no início do século XXI (ORTIZ NETO; COSTA, 2007).

Portanto, dentre as novas tecnologias adotadas na exploração brasileira, a aplicação de dutos flexíveis não aderentes foi, sem dúvida, um dos maiores diferenciais na agilidade de implementação e flexibilidade de seus projetos (ALBINO, 2011).

Seu desempenho em campo pode ser atribuído ao seu projeto de engenharia, já que é uma estrutura que combina baixa rigidez à flexão e elevada rigidez axial (XAVIER, 2009). É composto por diversas camadas que desempenham funções específicas devido às condições impostas em operação. A figura 1 apresenta um duto flexível de múltiplas camadas, estas camadas e suas respectivas funções são detalhadas abaixo.



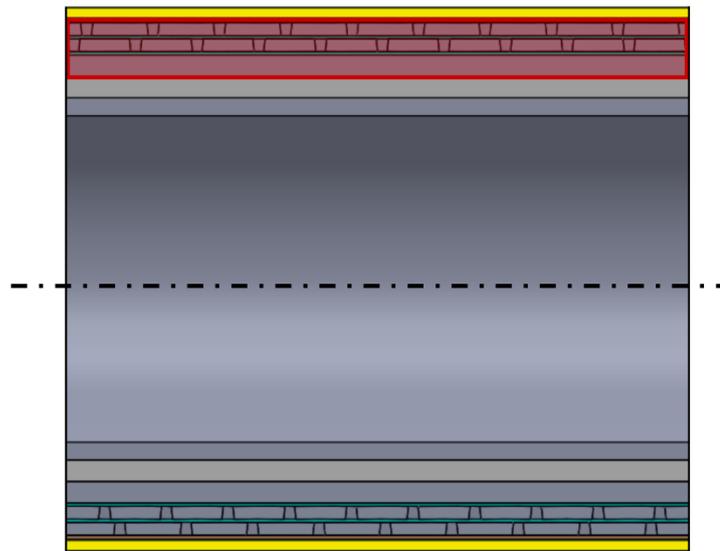
Figura 1 – Principais camadas estruturais de um duto flexível.  
 Fonte: LAMEF (2020).

- Carcaça – Estrutura metálica mais interna no duto, possui a função primária de prevenir o colapso da barreira de vedação interna. Seu material de fabricação é normalmente em aço inoxidável austenítico, AISI 304/304L ou AISI 316/316L, e outras ligas mais resistentes à corrosão, principalmente devido ao fato que esta camada ficar exposta ao fluido de exploração (FONTANA, 2013). Seu processo de fabricação ocorre por meio de conformação a frio e seu desempenho é adequado para carregamentos radiais, porém não possui resistência adequada para carregamentos axiais (BUENO, 2010).
- Barreira de vedação interna – Esta camada é responsável por conferir estanqueidade ao duto frente ao fluido transportado, constitui-se de uma camada contínua, produzida por extrusão de um polímero, normalmente poliamida 11 (BORGES, 2017). Situa-se em equilíbrio de pressões entre a carcaça e a armadura de pressão. A seleção do material desta camada é

fundamental para garantia da resistência química deste em relação ao fluido transportado e para garantir a proteção das estruturas metálicas do anular (BERGE et al., 2017). A permeação de gases do produto explorado para a região no anular está ligada às propriedades deste material.

- Armadura de pressão – Localizada acima da camada de vedação interna, esta camada não está em contato direto com o fluido transportado. Possui a função de prevenir a explosão da barreira de vedação interna e suportar o carregamento radial do duto devido à pressão interna imposta por ela (FONTANA, 2013). Diferentes geometrias de perfis são aplicadas a esta camada como: perfil Zeta; perfil C; Perfil T. Sua função secundária é garantir resistência à pressão externa, oriunda da compressão radial gerada pelo lançamento e pela carga transmitida pela armadura de tração (BORGES, 2017). O material desta camada é um aço ao carbono com teor aproximado de 0,6% carbono, conformado a frio (BUENO, 2010). O processo de conformação leva ao encruamento do material e aumento da resistência mecânica em relação ao material original e redução de sua tenacidade.
- Camada Antiatriço – Constituída de uma fita antiatriço, é composta de um material polimérico que tem a função de evitar o desgaste entre as armaduras metálicas (JMU et al., 2013). Possui em torno de 1 a 2 mm de espessura, podendo ser aplicada por extrusão ou assentada helicoidalmente ao longo do duto. Os polímeros comumente aplicados são Poliamida 11, Poliamida 12, Polietileno de alta densidade HDPE ou Poli (fluoreto de Vinilideno) PVDF.
- Armadura de tração – As armaduras de tração são posicionadas logo acima da fita anti atrito. Sua função principal é conferir resistência mecânica ao carregamento trativo, flexão e torção do duto (BERGE et al., 2017). Baseiam-se em arames metálicos, planos ou circulares, assentados helicoidalmente, geralmente um ângulo entre 20° e 55° que garante um balanço nos esforços da estrutura (LEROY; ESTRIER, 2001). A configuração em pares com ângulos opostos reduz o desbalanceamento torcional do duto (BERGE et al., 2017). Na configuração de 1 par, a armadura mais externa é chamada de armadura externa de tração e a mais interna de armadura interna de tração. As armaduras são fabricadas em aço ao carbono com alto grau de encruamento e elevada resistência mecânica.
- Fitas de alta resistência - Camada de tecido trançado que tem a função de conferir resistência a compressão do duto. Composta por uma camada fina e larga de tecido trançado de fibras sintéticas e assentadas durante o processo de fabricação com grande ângulo e sobrepostas. O material aplicado normalmente é a ARAMIDA, mais conhecido como Kevlar29° ou Kevlar49° (BORGES, 2017). É aplicado em pares com ângulos opostos de mesma forma que os arames de tração para balançar os esforços torcionais.
- Barreira de vedação externa – A barreira de vedação externa, ou capa externa, é responsável por manter a estanqueidade do duto em relação ao meio externo, a água do mar. Produzida através do processo de extrusão de um polímero, poliamida 11, ou HDPE, com possível aplicação de aditivos com a finalidade de obter propriedades específicas (BORGES, 2017).

A região de interesse na inspeção deste trabalho é conhecida como a região do anular. Esta região se estende desde a camada de vedação interna até a barreira de vedação externa. A figura 2 apresenta um corte transversal de um duto flexível, a região em vermelho é denominada região do anular. Nesta região são encontradas as armaduras de tração e de pressão, as quais são essenciais para a integridade desta estrutura.



### ■ Região do Anular

Figura 2 – Corte longitudinal de um duto flexível e em vermelho a região do anular deste duto.  
 Fonte: Elaborado pelo autor.

Os segmentos, ou tramos, de dutos flexíveis são conectados entre si por terminações flangeadas, denominados conectores. Dependendo do local de aplicação deste tramo pode haver alterações nas camadas estruturais do tramo, como exemplo, a adição de uma camada de isolamento térmico. Em geral, o tramo é composto por um corpo tubular (duto flexível) e dois conectores (*end-fittings*) em cada extremidade. Quanto à localização em relação à lâmina d'água dos dutos flexíveis, os tramos podem ser classificados:

- Duto Flexível de topo: É o tramo que possui uma de suas extremidades conectadas à unidade de produção. Normalmente possui um tramo curto, com 60 a 500 metros. Está sujeito a esforços extremos de tração e flexão. Quanto à corrosão, a região de maior preocupação é a próxima à superfície conhecida como zona de respingo (*splash zone*), pois nestas regiões o ambiente salino é altamente aerado e proporciona elevadas taxas de corrosão generalizada e localizada quando existir algum dano à capa externa (JMU et al., 2013).
- Duto Flexível intermediário: Tramo que vem na sequência do duto flexível de topo. É responsável por realizar a ligação do duto flexível de topo e o duto flexível de fundo. Possui longos comprimentos, em torno de 1000 metros. Estão sujeitos a carregamentos resultantes da unidade de produção e à interação com correntes marítimas. Sujeitos a altas pressões externas.
- Duto Flexível de fundo: Tramo que liga o duto flexível intermediário com o primeiro *flowline*. Caracteriza-se por ser o ponto de contato com o leito marinho, possui tramos longos, em torno de 1000 m. Está sujeito a carregamento de flexão e compressão, sua construção é reforçada com camadas extras de fitas de alta resistência para evitar defeitos de flambagem (BORGES, 2017). Devido ao atrito com o leito marinho tem recorrência de dano à capa externa e problemas de alagamento de anular e corrosão.
- *Flowlines*: São tramos estáticos, quase sem movimentação. Seus maiores esforços de tração e compressão estão no processo de instalação e recolhimento do duto, não são esperadas cargas dinâmicas ou movimentações destas estruturas (BERGE et al., 2017). Por outro lado,

são expostos a altas pressões externas e internas. Possuem comprimentos de 1000 a 5000 m (BERGE et al., 2017).

### 2.1.2 Modos de Falha em Dutos Flexíveis

Os modos de falha destas estruturas estão diretamente relacionados às suas condições de operação. A integridade estrutural dos dutos flexíveis é um tema de frequente discussão entre pesquisadores e fabricantes. A interrupção do uso de um duto flexível pode ocorrer devido à ruptura progressiva das armaduras de tração, levando à exposição do interior da estruturas; ruptura da camada externa, na existência de um vazamento provindo do interior; colapso da carcaça (BERGE et al., 2017). As perdas de funcionalidade das estruturas estão relacionadas aos danos existentes nas camadas e aos limites de aceitabilidade para estes. Dentre as causas de falha estão: mecanismos de degradação, como corrosão, erosão; eventos que causem um dano, como impacto entre dutos flexíveis e/ou cargas de serviço. As causas principais de falha em relação às camadas do duto flexível são apresentadas na tabela 1.

**Tabela 1** – Principais causas de falha para as respectivas camadas estruturais de dutos flexíveis.

Camada do Duto	Falha	Causa da Falha
Carcaça	Destramento por deformação	Excesso de carga axial ou flexural.
	Colapso	Excessiva diferença de pressão através da parede da carcaça. Corrosão, erosão ou desgaste da espessura da carcaça.
	Trinca circunferencial	Fadiga, desgaste por atrito, corrosão e corrosão sob tensão.
	Trinca, furo ou ruptura	Envelhecimento, Fadiga e desgaste.
Barreira de vedação interna	Colapso	Excessiva diferença de pressão através da parede e colapso associado à falha da carcaça Corrosão, desgaste e fadiga,
	Ruptura do arame	trinca induzida por hidrogênio e excesso de pressão interna
Armadura de Pressão	Colapso	Excesso de tensão axial, flexural e torcional. Impacto
	Trinca longitudinal	Desgaste e concentrador de tensão local.
Camada antiatrito	Desgaste excessivo	Envelhecimento do material, desgaste. Redução de secção devido à corrosão. Trinca induzida por hidrogênio ou corrosão sob tensão.
	Ruptura dos arames	Excesso de tensão ou pressão interna. Fadiga, ruptura por impacto, desgaste.
Armaduras de tração	Flambagem do duto	Compressão axial excessiva.
	Torção	Impacto, erro de fabricação, instalação.

Barreira de vedação externa	Furo, rasgo ou ruptura	Impacto, desgaste, pressão excessiva no anular. Envelhecimento
-----------------------------	------------------------	--

Fonte: BERGE et al., (2017) e SIMONSEN (2014).

Dentro das causas de falha citadas na tabela 1, as armaduras de pressão e tração compartilham de mecanismos semelhantes, como os mecanismos de degradação pelo meio. Além do fato de estarem presente na mesma região, o anular. O mecanismo de corrosão destas camadas metálicas ocorre devido à presença de água na fase líquida e pode ser acentuado na presença de gases como CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S e O<sub>2</sub>, cada um destes trazendo uma particularidade ao processo (BERGE et al., 2017).

O processo de corrosão leva à redução da seção transversal dos arames e consequentemente à redução da carga máxima admissível. A irregularidade da superfície e a possível formação de pites reduz a resistência à fadiga, levando à nucleação de defeitos, como trincas, e ao rompimento precoce de arames, além da fragilização destes arames pelos gases presentes. Para o pior cenário estima-se que a espessura dos arames pode reduzir até 1mm/ano. Algumas das mais sérias falhas de dutos flexíveis ocorreram devido à corrosão das armaduras (JMU et al., 2013). Estes incidentes resultaram em grandes prejuízos para a operação e todos os dutos flexíveis que sofreram estes incidentes possuíam algum dano na barreira de vedação externa e operavam com este dano. O dano na barreira de vedação externa e consequente alagamento do anular vêm sendo considerados como a causa mais comum de falha nos dutos flexíveis (BOSCHEE, 2012; ERIKSEN, 2014) (O'BRIEN; PICKSLEY; OFIICE, 2001). A figura 3 apresenta as principais falhas em dutos flexíveis e suas frequências. Assim, a determinação, com confiabilidade, da existência de alagamento na região do anular é fundamental para o gerenciamento destas estruturas.

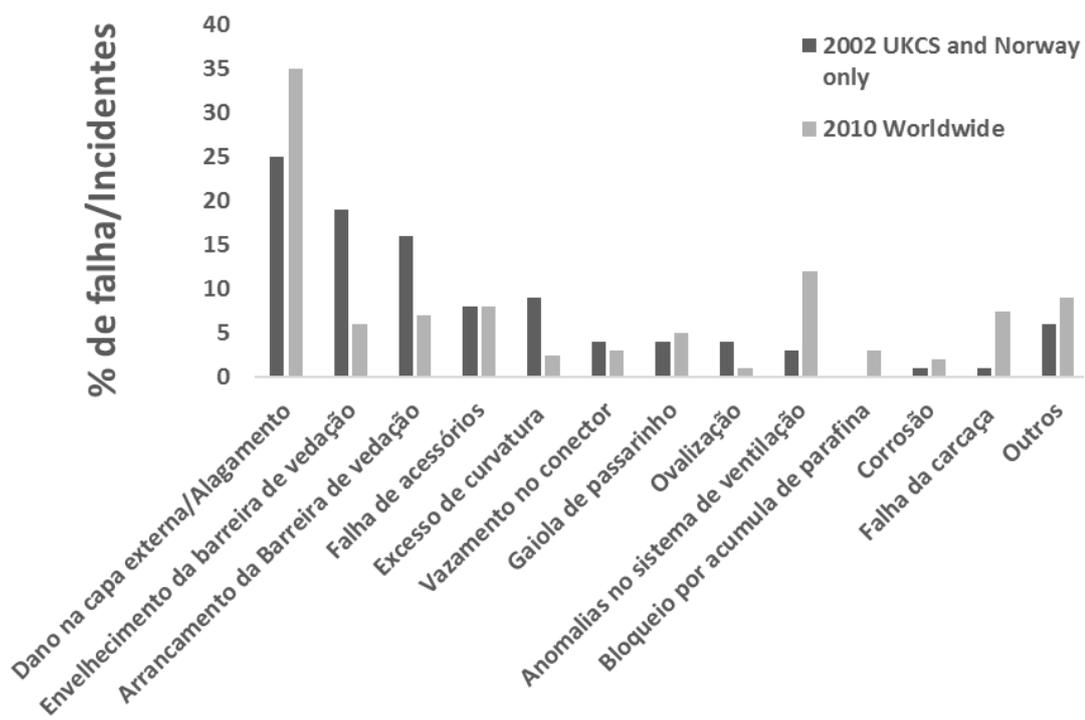


Figura 3 – Principais falhas em dutos flexíveis  
Fonte: Adaptado de BOSCHEE (2012).

### 2.1.3 Condição de Anular Alagado

Em consequência do projeto estrutural dos dutos flexíveis não aderidos, espaços e vazios entre as camadas são criados, e estes estão preenchidos com ar atmosférico desde o processo de fabricação. A vedação deste tipo de estrutura ocorre nos componentes conhecidos como conectores. O espaço do anular geralmente é medido em uma grandeza que relaciona o volume ocupado com o volume total, uma relação em torno de 0,85 a 0,95 (ERIKSEN, 2014).

A condição inicial do anular é conhecida como anular seco e é preenchida apenas com ar atmosférico, como mencionado anteriormente. Em cada conector são instaladas válvulas de alívio unidirecionais, *vent valves*, que controlam possíveis elevações de pressão na região do anular, permitindo o alívio de pressão para condições superiores a 3 bar em relação à pressão hidrostática. A elevação da pressão na região do anular pode ocorrer devido ao acúmulo de gases oriundos dos produtos de exploração que permeiam através das camadas poliméricas. (BAI; BAI, 2005). Esta condição de anular seco pode ser modificada pelo ingresso de fluidos na região do anular, seja pelo ingresso de água do mar devido ao rompimento da barreira de vedação externa, e/ou pela permeação de gases ou fluidos através da barreira de vedação interna. A figura 4 exemplifica este mecanismo.

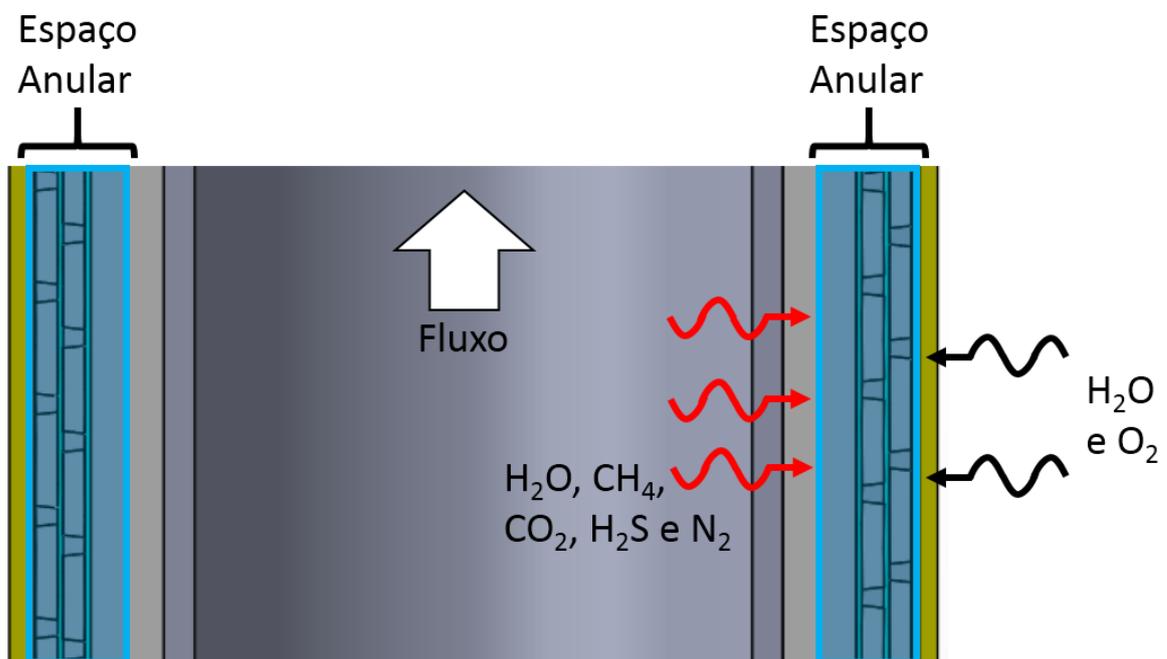


Figura 4 – Mecanismo externo(preto) e interno(vermelho) de ingresso de água e gases na região do anular.

Fonte: Elaborado pelo autor.

A localização do dano implica na severidade da corrosão, pois diferentes cotas das estruturas estão submetidas a diferentes concentrações de gases e pressões. Os espaços no anular estão dispostos de forma não homogênea e ocorrem regiões de estagnação de fluido (ERIKSEN, 2014). Logo, o processo de inspeção desta estrutura deve ser realizado em mais de um local ao longo do comprimento.

### 2.1.4 Métodos de Inspeção para o Alagamento do Anular

A inspeção de estruturas como dutos flexíveis é fundamental para a segurança de toda a operação. Os desafios impostos aos métodos e ferramentas de inspeção são gigantescos, principalmente devido à complexa estrutura na qual são formadas. Além disso, diversos mecanismos de degradação atuam de forma conjunta nos mais remotos ambientes. Desenvolver dispositivos e métodos que possam detectar condições favoráveis para os mecanismos de degradação, como a presença de água na região do anular, podem ser essenciais nas estimativas do fator de utilização destas estruturas. Como também auxiliar na identificação de possíveis riscos e auxiliar na tomada de decisão.

Duas formas de abordagem na análise podem ser observadas entre os dispositivos aplicados para inspeção, a detecção de água do mar e a detecção de rupturas na camada externa de vedação, que conseqüentemente pode levar ao alagamento da região do anular. As técnicas de inspeção que podem auxiliar na detecção do alagamento do anular são apresentadas na tabela 2.

Tabela 2 – Técnicas de inspeção aplicadas em dutos flexíveis.

	Princípio	Deteccção da Falha	Pontos positivos	Pontos Negativos	Maturidade da Técnica	Estado da Arte
Inspeção Visual	Inspeção visual da integridade externa da estrutura.	Rasgos e furos da camada externa de vedação.	Fácil inspeção, visão ampla da estrutura.	Não indicação de defeitos devido à pouca visibilidade.	Tecnologia já em uso.	Inspeções com uso de ROVs.
Teste de Pressão no anular	Injeção de gás nitrogênio através das <i>vents valves</i> .	Integridade interna e externa das camadas de vedação.	Possível detectar a localização de danos na camada externa.		Tecnologia já em uso.	
Teste por Ultrassom	Envio de um pulso ultrassônico através da barreira externa de vedação e análise da reflexão.	Detecta presença de água no anular.	Precisão de 100 % na deteccção de água no anular )	As superfícies do duto flexível precisam estar limpas.	Tecnologia já em uso.	Ferramenta aplicada em um ROV.
Fibra Ótica	Variações na temperatura do meio alteram o sinal de análise.	Ingresso de água no anular.	Aplicação em ambiente classificado Longas distâncias para operação.	Instalação durante fabricação.	Tecnologia testada.	Testada por NKT Flexibles.

Fonte: SIMONSEN (2014) e NOTT MCNAB (2016).

Entre as técnicas apresentadas acima, o ultrassom e a fibra ótica são direcionados a detectar a presença de água. Das duas, apenas o ultrassom está em operação em dutos flexíveis. A fibra ótica não obteve bom desempenho em aplicação devido ao aquecimento da água em contato com a estrutura (NOTT; MCNAB, 2016). Assim, novas tecnologias de inspeção devem ser propostas para complementar os métodos de gerenciamento e fornecer dados confiáveis aos gestores, surgindo o dispositivo de inspeção proposto neste trabalho, o qual opera com o uso de radiofrequência.

## 2.2 Identificação por Radiofrequência - RFID

Nesta seção serão detalhados os conceitos e denominações utilizados em dispositivos de identificação por radiofrequência, como a concepção dos elementos de um dispositivo RFID, parâmetros de operação, e critérios para seleção de dispositivos.

### 2.2.1 Dispositivos de Identificação por Radiofrequência.

O uso de dispositivos de identificação por radiofrequência tornou-se uma ferramenta de controle excepcional, seja aplicado no rastreamento de objetos, identificação de funcionários, controle de tráfego e outros. O diferencial desta técnica em relação aos códigos de barra é a capacidade de armazenamento de outras informações no componente integrado de identificação, levando à ampliação de suas aplicações, como é o caso de cartões de banco e *smarts cards*. O uso de transferência de dados sem o contato entre o dispositivo e o leitor é bastante abrangente, além do fato de tal dispositivo operar de forma passiva. 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 (GLOVER, B.; BHATT, H. 2006).

O mercado do RFID apresentou um dos mais rápidos crescimentos na indústria da tecnologia, comparando-se os desenvolvimentos em celulares e telefones sem fio. Este rápido desenvolvimento está entrelaçado aos fundamentos utilizados na tecnologia e sua capacidade de combinação em diversas áreas (FINKENZELLER, 2010a). As primeiras aplicações de dispositivo de identificação por radiofrequência foram registradas na época da 2ª guerra mundial, em que se buscava identificar se o avião era aliado ou inimigo (SHEPARD, 2005). Após este período, suas aplicações foram direcionadas à vigilância de artigos em lojas de departamentos e dispositivos antifurto. Diversas empresas e instituições acadêmicas começaram a desenvolver tecnologias para dispositivos de identificação, porém somente o avanço tecnológico na área de semicondutores possibilitou a redução de preços e a aplicabilidade destes dispositivos em grande escala (SHEPARD, 2005). A criação de normas e plataformas comuns facilitou seu processo de globalização, culminando na grande aplicabilidade destes dispositivos nos dias de hoje.

Um dispositivo RFID é sempre composto de no mínimo 2 componentes, o *transponder*, que para este trabalho será o sensor, e o interrogador. O *transponder* é posicionado sobre o objeto a ser identificado, e o interrogador é responsável pela leitura e gravação de dados no

dispositivo, como também, pelo fornecimento de energia. A figura 5 apresenta os componentes típicos de um dispositivo RFID (SANGHERA, P. et al. (2007)).

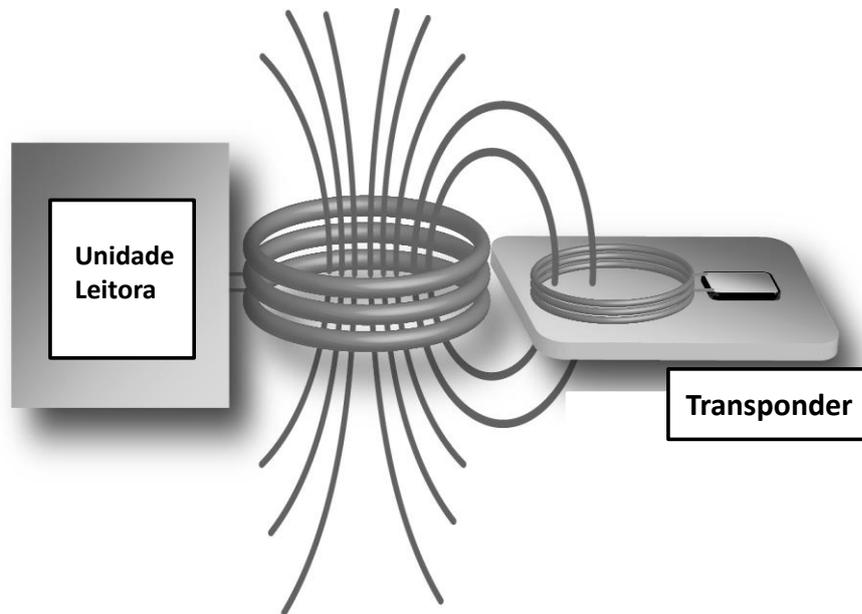


Figura 5 – Componentes típicos de um dispositivo RFID.  
Fonte: Elaborado pelo autor.

A frequência de operação, a distância e o método de acoplamento destes dispositivos estão intrinsicamente correlacionados por meio de conceitos eletromagnéticos e selecionados em função das características do local de aplicação. As frequências de operação mais difundidas e aplicadas nestes dispositivos estão entre 125 KHz a 5.8 GHz, acarretando em distâncias de operação de alguns milímetros até metros. As principais bandas de frequências são: baixa frequência (*LF – Low frequency*); alta frequência (*HF – High frequency*); ultra alta frequência (*UHF – Ultra High Frequency*); micro-ondas (SANGHERA, P. et al. ,2007).

Nos dispositivos RFID os valores de frequência estão diretamente correlacionados com a distância de operação. Porém, cabe ressaltar que outros fatores como tipos de *transponders*, tamanho da geometria e local de aplicação podem influenciar na distância de leitura (SANGHERA et al., 2007). Dessa forma, ao projetar a aplicação de um dispositivo RFID, deve-se aplicar critérios de seleção, procurando o melhor dispositivo que irá atender à demanda. A tabela 3 apresenta um comparativo entre as bandas de frequência mais aplicadas nos dispositivos RFID.

Tabela 3 – Comparativos entre bandas de frequência de dispositivo RFID.

	Baixa Frequência 125 KHz	Alta Frequência 13.56 MHz	Ultra Alta Frequência 915 MHz
Funcionamento	Acoplamento Indutivo	Acoplamento Indutivo	Retroespalhamento
Distância (m)	0,1	1	15

Taxa de transferência dados	Baixa	Média	Alta
-----------------------------------	-------	-------	------

---

Fonte: (SANGHERA, P. et al., 2007).

O detalhamento da banda de frequência aplicada neste trabalho pode ser visualizado abaixo:

- Alta frequência – Possui frequência de operação de 13.56 MHz, usualmente aplicada em cartões inteligentes e etiquetas inteligentes. Opera através de acoplamento indutivo e possui distâncias de operação, taxas de transmissão de informação e memória superiores quando comparada a dispositivos de baixa frequência, além de funcionar de forma ativa e passiva. Possui dispositivos anticollisão que permitem a leitura simultânea de mais de um *transponder*. É produzida geralmente a partir de fios de cobre na forma de espirais planares. Sua performance é afetada na presença de metais e líquidos e é aplicada em rastreamento de ativos, cartões de crédito e etiquetas de bibliotecas. Estes dispositivos operam com distâncias de até 1m e são conhecidos como dispositivos de acoplamento remoto, em sua maioria baseados em acoplamento indutivo, magnético. Estima-se que 90% de todos os dispositivos RFID vendidos até o momento operem com acoplamento indutivo (CURTY et al., 2007; FINKENZELLER, 2010a). Existe uma série de padrões que especificam parâmetros técnicos de *transponder* e de leitores para diversas aplicações. Nestes padrões estão incluídos ISO 14443, norma para cartões inteligentes sem contato e ISO 15693, norma para dispositivos acoplados por proximidade.

A operação de dispositivos RFID é viável uma vez que seus mecanismos de acoplamento permitem a transmissão de energia e informação através de campos ou ondas eletromagnéticas. O tipo de acoplamento afeta diretamente a distância de operação destes dispositivos (GLOVER; BHATT, 2006). Os dados e a energia são transmitidos principalmente através de dois métodos, o acoplamento por retroespalhamento e o acoplamento indutivo.

O acoplamento indutivo, método aplicado neste trabalho, é baseado no fato de dois componentes, o *transponder* e o interrogador, compartilharem linhas de um campo magnético alternado. Normalmente, o interrogador e o *transponder* são sintonizados com a mesma frequência de ressonância e a potência transmitida entre eles é proporcional à frequência, número de voltas e área das bobinas, corrente de alimentação do circuito, ângulo e distância entre as bobinas. A figura 6 apresenta o mecanismo de funcionamento do dispositivo. A transferência de informação entre os dispositivos ocorre através da modulação de carga. Normalmente, os dados são transmitidos pela modulação no tempo destas subportadoras e suas frequências típicas são 212 kHz, 424 kHz e 848 kHz. (FINKENZELLER, 2010a; GLOVER; BHATT, 2006)

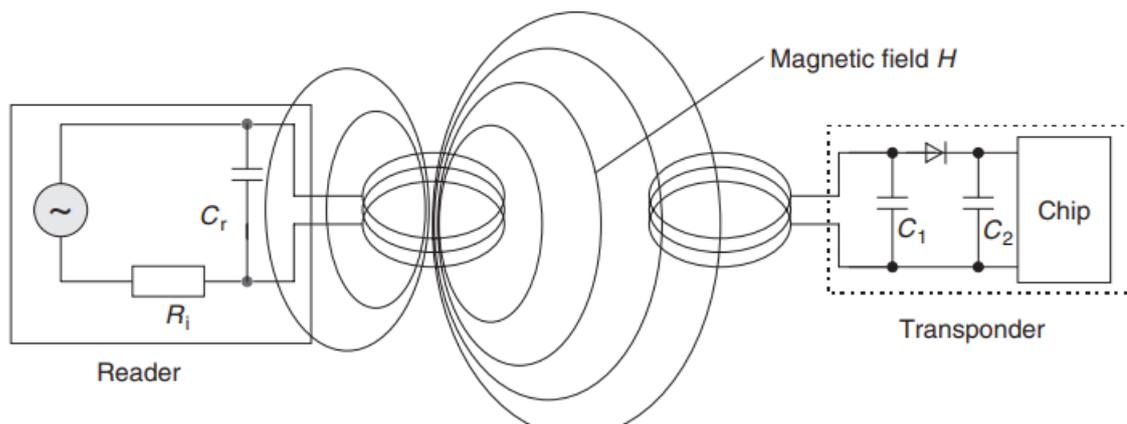


Figura 6 – Princípio de operação por acoplamento indutivo.  
Fonte: FINKENZELLER (2010).

### 2.3 Princípios Físicos de Dispositivos RFID

Como este trabalho é focado em um dispositivo de inspeção com uso de RFID e que opera em alta frequência, esta seção irá abordar os princípios físicos do acoplamento magnético de dispositivos RFID.

#### 2.3.1 Fundamentos do Eletromagnetismo

As definições de campo magnético e o seu surgimento a partir de correntes elétricas são bem entendidas e aplicadas nas tecnologias atuais. O movimento de cargas em um condutor está sempre associado à geração de um campo magnético. O campo magnético é o responsável pelo acoplamento de dispositivos RFID, conhecer seu comportamento, intensidade e influência é essencial para o desenvolvimento destes dispositivos. Cabe ressaltar que estes dispositivos operam com campos magnéticos variáveis no tempo. A intensidade do campo magnético pode ser correlacionada com a corrente elétrica através do uso da Lei de Ampère, como a equação 1 apresenta (STEFFEN; REINHOLD, 2010).

$$I = \oint_L H \cdot dl \quad (1)$$

Onde:

$I$	Corrente Elétrica	[A]
$H$	Intensidade do Campo magnético	[A/m]
$L$	Comprimento	[m]

As bobinas de dispositivos RFID podem ser consideradas *loops* condutores, uma vez que são utilizadas para gerar o campo magnético alternado nos dispositivos devido à passagem de corrente elétrica. Ao se realizar a medição da intensidade do campo magnético em um ponto

que se move para longe do centro de um *loop* condutor, ao longo de seu eixo, verifica-se que a intensidade do campo magnético irá diminuir com o aumento da distância.

A equação que descreve como calcular a intensidade do campo magnético gerado por uma bobina, similar aos *loops* condutores encontrados em aplicações de dispositivos RFID acoplados indutivamente, equação 2, pode ser verificada abaixo (STEFFEN; REINHOLD, 2010).

$$H = \frac{I \cdot N \cdot r_r^2}{2\sqrt{(r_r^2 + x^2)^3}} \quad (2)$$

Onde:

N	Número de voltas da bobina	
$r_r$	Raio da Bobina leitora	[m]
$x$	Distância longitudinal a partir do centro de seu eixo	[m]

Para o projeto de dispositivos RFID, a bobina emissora é comumente chamada de leitor e o raio deste leitor pode ser projetado de acordo com a distância de leitura pretendida, e dessa forma, obter a maior magnitude da intensidade do campo magnético. Componentes integrados de identificação baseados na ISO/IEC 14443 geralmente necessitam de, no mínimo, 1,5 A/m de intensidade do campo magnético para o seu funcionamento (DE MULDER et al., 2009). A geração de curvas, a partir da equação 2, correlacionando a intensidade do campo magnético, raio do leitor e a distância de leitura pretendida pode ser verificada na figura 7.

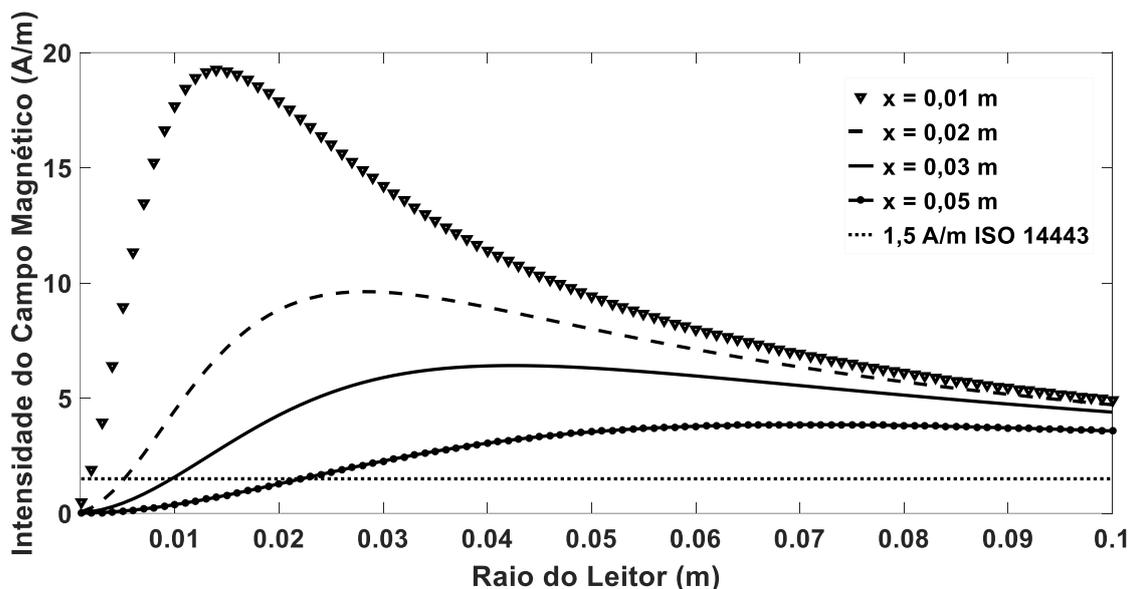


Figura 7 – Correlação entre a intensidade do campo magnético, o raio do leitor e a distância entre a bobina do leitor e a bobina do sensor.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Na figura 7, pode ser visualizada a redução da intensidade do campo magnético com o aumento da distância entre o sensor e o leitor. O ponto mais importante ilustrado na figura 7, refere-se à posição do máximo das curvas, uma vez que, com o aumento da distância entre o sensor e leitor, ocorre o deslocamento da posição deste máximo e, assim, a comunicação com o sensor pode ser prejudicada. Como exemplo, se um leitor com o raio de 0,01 m for aplicado a uma distância de 0,05 m, não irá funcionar de forma correta, já que a intensidade do campo magnético não será suficiente para o funcionamento do componente integrado. Logo, uma maneira de otimizar o projeto do leitor e conseqüentemente a distância de operação do dispositivo, é utilizar um raio adequado para a distância entre o leitor e o sensor, proposta no projeto.

Através da relação entre a intensidade do campo magnético e o meio material é possível se obter a densidade de fluxo magnético, equação 3 (SADIKU, 2015).

$$B = \mu_0 \mu_r H \quad (3)$$

Onde:

$\mu_r$	Permissividade relativa do meio	
$\mu_0$	Permissividade absoluta	[H/m]
$B$	Densidade de fluxo magnético	[Wb/m <sup>2</sup> ]

Com o conhecimento da densidade de fluxo magnético é possível obter o fluxo magnético, que atravessa uma superfície qualquer, equação 4 (SADIKU, 2015).

$$\Psi = \oint_S B \cdot ds \quad (4)$$

Onde:

$\Psi$	Fluxo magnético	[Wb]
$S$	Superfície	[m <sup>2</sup> ]

Assim, com a definição de fluxo magnético, o conceito da Indutância Mútua pode ser apresentado. Ela ocorre devido à presença de um segundo loop condutor, condutor 2, com área  $A_2$ , que é posicionado próximo ao um loop condutor principal, com área  $A_1$ , e este é alimentado com corrente elétrica.

Quando isto ocorre, o segundo loop estará sujeito a receber uma porção do fluxo magnético total gerado pelo loop condutor principal. Assim, os dois circuitos estarão conectados por este fluxo parcial, ou fluxo de acoplamento. A magnitude do fluxo de acoplamento  $\Psi_{21}$  depende da geometria dos dois condutores, da posição relativa entre eles e das propriedades magnéticas do meio. A indutância mútua do condutor 2 em relação ao condutor principal,  $M_{21}$ , pode ser definida pela equação 5 (SADIKU, 2015).

$$M_{21} = \frac{\Psi_{21}(I_1)}{I_1} \quad (5)$$

Onde:

$$M_{21} \quad \text{Indutância Mútua} \quad [\text{H}]$$

O efeito da indutância mútua é o mais importante para esta aplicação, já que a variação do fluxo magnético induz tensão elétrica no condutor adjacente e permite o funcionamento do componente integrado de RFID. A geração de corrente elétrica a partir de um fluxo magnético variável é o fenômeno descrito pela Lei de Faraday. (SADIKU, 2015). A equação 6 mostra a forma geral desta lei.

$$u_i = \oint E_i \cdot ds = - \frac{d\Psi(t)}{dt} \quad (6)$$

Onde:

$$\begin{array}{ll} E_i & \text{Campo Elétrico} \quad [\text{V/m}] \\ u_i & \text{Diferença de potencial} \quad [\text{V}] \end{array}$$

Da mesma forma que a indutância mútua descreve o acoplamento de dois circuitos através de um campo magnético, o coeficiente/fator de acoplamento pode ser aplicado como outro método para quantificá-lo. O coeficiente pode ser estimado através das Equações 7 e 8. Os valores do coeficiente podem ser interpretados como zero, para totalmente desacoplado, e um, para totalmente acoplado. Quando o valor do coeficiente é igual a um os loops condutores estão expostos a exatamente o mesmo fluxo magnético (FINKENZELLER, 2010). Para dispositivos em que o raio da bobina do leitor é maior ou igual ao raio da bobina do sensor,  $r_s$ , o valor do coeficiente do acoplamento pode ser obtido através da equação 7. (FINKENZELLER, 2010)

$$k = \frac{r_s^2 * r_r^2}{\sqrt{r_s * r_r} * (\sqrt{x_d^2 + r_r^2})^3} \quad (7)$$

Onde:

$$r_s \quad \text{Raio da bobina do sensor} \quad [\text{m}]$$

Já para dispositivos cujo raio da bobina do leitor é menor ou igual ao raio da bobina do sensor, o valor do coeficiente do acoplamento pode ser obtido através da equação 8 (FINKENZELLER, 2010).

$$k = \frac{r_s^2 * r_r^2}{\sqrt{r_s * r_r} * (\sqrt{x_d^2 + r_s^2})^3} \quad (8)$$

A figura 8 apresenta o comportamento do valor do fator de acoplamento em relação à distância entre o leitor e o sensor para diferentes valores de raio do sensor. O valor do raio do leitor foi mantido constante. Nota-se que o maior valor de coeficiente de acoplamento magnético ocorre quando as bobinas do sensor e do leitor possuem o mesmo valor de raio e estão afastadas a uma distância de até 0,035 m. A partir desta distância um sensor com o raio maior que o raio do leitor obtém um maior valor de coeficiente de acoplamento, vide figura 8.

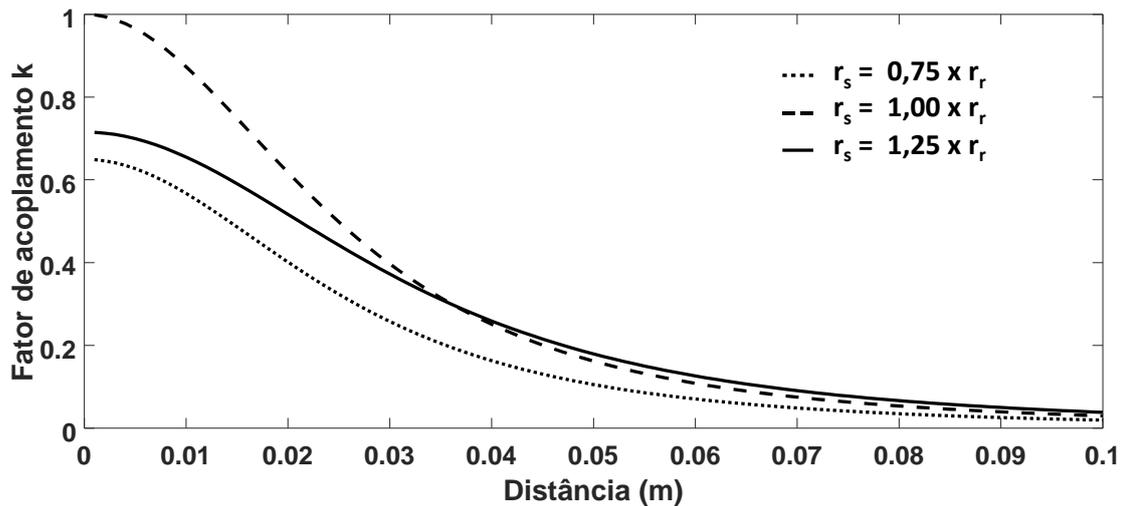


Figura 8 – Comportamento do fator de acoplamento com o aumento da distância,  $x_d$ , para diferentes relações entre o raio da bobina leitora e do sensor.

Fonte: Elaborado pelo autor.

A figura 9 avalia como o aumento do raio, mantendo uma relação entre o raio do sensor e o raio do leitor igual a um, modifica o fator de acoplamento magnético. Verifica-se que a redução do raio leva a uma redução no fator de acoplamento. Assim, raios maiores podem ampliar as distâncias de leitura e suas aplicações.

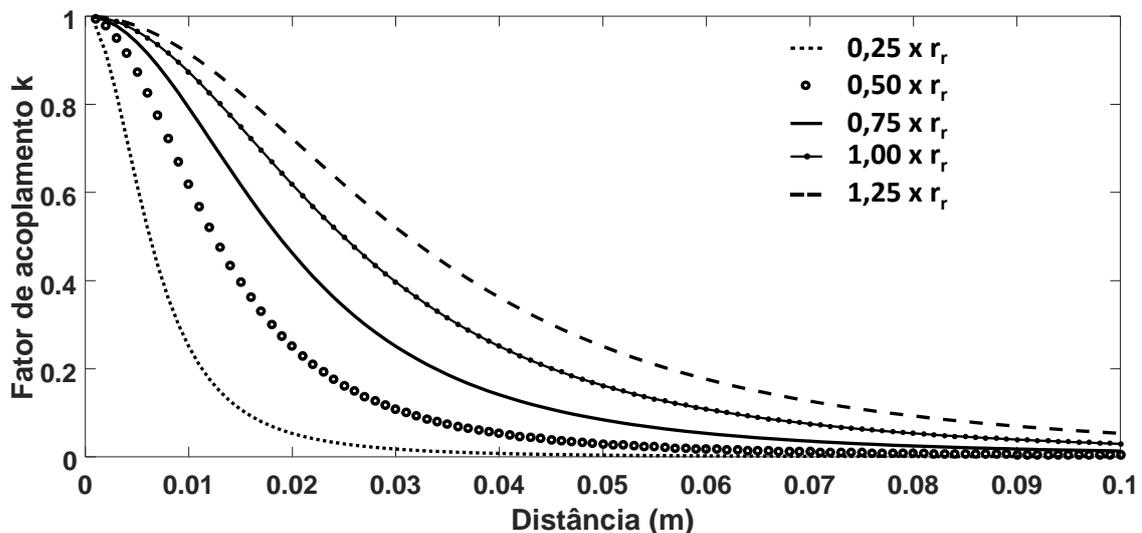


Figura 9 – Comportamento do coeficiente de acoplamento com a distância de leitura para diferentes valores do raio de projeto.

Fonte: Elaborado pelo autor.

### 2.3.2 Circuito Elétrico e a Frequência de Ressonância

Nesta seção será abordado o circuito elétrico equivalente para o dispositivo, bem como o princípio de detecção das alterações da condição do anular. O dispositivo proposto neste trabalho consiste de uma bobina leitora e um sensor, este dispositivo pode ser exemplificado através de um circuito elétrico, figura 10.

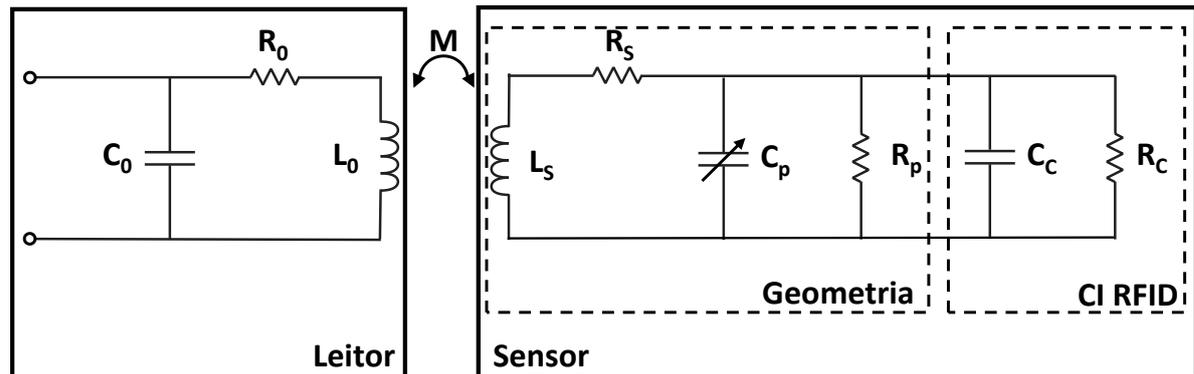


Figura 10 – Circuito elétrico do dispositivo leitor/sensor.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Onde:

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

Como o dispositivo irá operar em alta frequência, este circuito deve considerar a existência de uma capacitância parasita na bobina do sensor, uma vez que há proximidade entre os condutores da bobina, diferença de tensão elétrica entre os condutores e a presença de um dielétrico. Estes fatores levam à formação de pequenos capacitores ao longo da geometria da bobina (BOWICK, 1982; KAISER, 2005; ROBBINS; MILLER, 2013; SCHMITT, 2002).

Pode-se notar na figura 10 que a capacitância parasita representada pelo capacitor  $C_p$  possui o símbolo de um capacitor variável, já que a alteração da condição de anular seco para anular alagado irá alterar o valor de sua capacitância.

A figura 11 apresenta uma exemplificação dos capacitores que são gerados entre as trilhas da bobina e como as linhas do campo elétrico são formadas entre os condutores neste

caso. Para a região interna, as trilhas possuem um comportamento do campo elétrico semelhante ao descrito por um capacitor de placas paralelas, figura 11-b) curvas em preto. No entanto, o mais importante a observar é a geração de capacitores nas camadas superiores e inferiores às trilhas condutoras, figura 11-a), e conseqüentemente, as linhas de campo elétrico nestas camadas, figura 11-b). Isto ocorre devido aos efeitos de franja, *Fringe Effects*, que são gerados nas extremidades destes condutores (EREN; SANDOR, 2005). Assim, qualquer variação de permissividade destas regiões gerará uma alteração de capacitância (DEAN et al., 2012; HU; YANG, 2010).

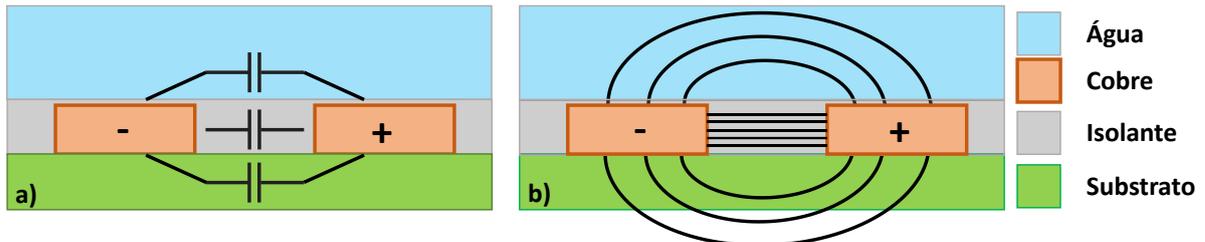


Figura 11 – Mecanismo de detecção de alteração de meio. a) Capacitores gerados entre os condutores. b) Campo elétrico gerado entre os condutores e o efeito de frangeamento do campo elétrico.  
Fonte: Elaborado pelo autor.

Com a informação de que a alteração da condição do meio ao redor do sensor leva a uma variação do valor da capacitância parasita e, conseqüentemente, a uma alteração da capacitância equivalente do sensor, podemos correlacionar esta informação a uma variação na frequência de ressonância, já que a frequência de ressonância para sensor RFID proposto pode ser obtida através da equação 9. O valor da capacitância equivalente para o sensor pode ser obtido através da equação 10. O entendimento deste parâmetro é fundamental na compreensão do funcionamento deste tipo de dispositivo de detecção, uma vez que o sinal de referência para condição do anular é o valor da frequência de ressonância (FINKENZELLER, 2010).

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_s C_e}} \quad (9)$$

Onde:

$f_0$	Frequência de Ressonância	[Hz]
$C_e$	Capacitância Equivalente para sensor	[F]

$$C_e = C_p + C_c \quad (10)$$

Fontes de geração eletromagnética possuem diversas formas e intervalos de frequências característicos. A tensão e a corrente são parâmetros de difícil medição em estruturas de micro-ondas, assim o uso de redes pode facilitar este processo (DA SILVA, 2001).

A reflexão e a transmissão de ondas eletromagnéticas em linhas de transmissão são frequentemente associadas aos parâmetros de espalhamento, parâmetros S. Os parâmetros S

descrevem o comportamento de redes elétricas lineares devido à influência de sinais elétricos (KHAN, 2014).

Redes com N portas possuem inúmeras formas de aplicações como filtros, transformadores de impedância e outros. Este trabalho irá abordar o uso de um dispositivo com uma porta de rede. Como uma forma de melhorar o entendimento dos parâmetros de espalhamento, a dedução e a contextualização do parâmetro S<sub>11</sub> podem ser verificadas em MAVADDAT (1996).

O parâmetro S<sub>11</sub> em função das amplitudes da onda pode ser obtida através da equação 11 (MAVADDAT, 1996).

$$S_{11} = \frac{b_1}{a_1} = \frac{I_1^r}{I_1^i} = \frac{V_1^r}{V_1^i} = \frac{V_1 - R_1 I_1}{V_1 + R_1 I_1} \quad (11)$$

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

Os analisadores de rede são instrumentos amplamente utilizados para medição de parâmetros de espalhamento, possuem ótima eficiência e precisão em suas medições. Estes equipamentos são amplamente utilizados na caracterização de amplificadores, filtros e antenas, podem também ser aplicados para obtenção de propriedades de materiais (KHAN, 2014).

Seu funcionamento pode ser baseado na geração de um sinal senoidal no dispositivo em teste, (DUT). O sinal que retorna do DUT para o analisador de rede possui amplitude e fase diferente quando comparado ao sinal incidente no DUT. Estas diferenças entre os sinais, como explicado anteriormente, são quantificadas pelo equipamento. Os analisadores de rede possuem 2 classificações: Analisadores de rede escalares, que realizam apenas a medida da amplitude dos sinais; e analisadores de rede vetoriais, que realizam a medida não apenas da amplitude dos sinais, como da fase de ondas incidente e refletidas (MAVADDAT, 1996; SHOAI B, 2017).

O parâmetro S<sub>11</sub> pode ser utilizado como forma de obtenção da frequência de ressonância de circuitos elétricos, um pequeno valor de S<sub>11</sub> indica uma alta eficiência de transmissão. O valor da frequência de ressonância pode ser definido como a posição do menor valor do parâmetro S<sub>11</sub>, vide figura 12. Como o parâmetro S<sub>11</sub> é uma medida de reflexão do sinal na porta 1, um sinal com valor extremamente baixo sugere alta transmissão, ou seja, grande parte da energia foi absorvida e transmitida pela estrutura conectada à porta 1. (SHOAI B, 2017)

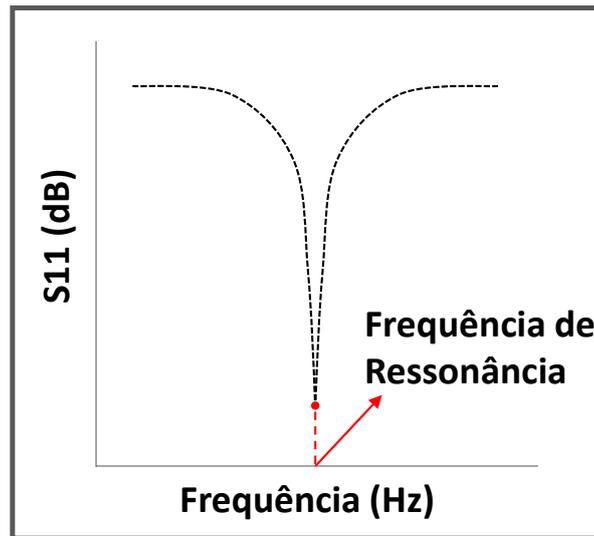


Figura 12 – Definição da Frequência de Ressonância através do Parâmetro S11  
 Fonte: Elaborado pelo autor.

### 2.3.3 Profundidade de Penetração e Atenuação

A propagação de ondas eletromagnéticas em meios dispersivos e absorptivos está correlacionada com a condutividade do meio, permeabilidade e permissividade (ZHANG; MENG, 2012). A aplicação de dispositivos submersos que operem por radiofrequência está atrelada diretamente às propriedades elétricas e magnéticas da água. A molécula de água é composta por dois átomos de hidrogênio e um átomo de oxigênio conectados através de uma ligação covalente. Isso significa que um vértice da molécula possui uma carga parcial negativa, enquanto os outros possuem uma carga positiva. Uma molécula na qual as cargas estão em equilíbrio é chamada de dipolo elétrico e possui uma tendência a se orientar sob efeito de um campo elétrico uniforme. A condutividade da água é uma função da concentração de íons dissolvidos nela. A adição de sais à água leva à geração de íons negativos e positivos e ao fenômeno de dissociação eletrolítica e, assim, a corrente elétrica pode fluir por estas soluções. (BENELLI; POZZEBO, 2013). A condutividade da água do mar para fins de desenvolvimento do dispositivo deste trabalho será definida com o valor de 4 S/m, porém, sabe-se que este valor pode variar de acordo com a quantidade e o tipo de íons dissolvidos na solução.

Dispositivos que operam embaixo d'água com radiofrequência estão limitados pela profundidade de penetração do campo magnético (MOORE, 1967). A profundidade de penetração pode ser definida como a distância na qual uma onda eletromagnética consegue penetrar em um material até que sua intensidade se reduza em 37%, 1/e do valor inicial (MEHDIZADEH, 2015). Como a água do mar é um material com altas perdas dielétricas,  $\epsilon_r'' \gg \epsilon_r'$ , (CHEN, 2004), a profundidade de penetração pode ser calculada através da equação 12 (CHEN, 2004; MEHDIZADEH, 2015; WANG; YANG, 2015).

$$D_p = \sqrt{\frac{1}{f\pi\mu\sigma}} \quad (12)$$

Onde:

$D_p$	Profundidade de Penetração	[m]
$\sigma$	Condutividade elétrica	[S/m]
$f$	Frequência	[Hz]
$\mu$	Permeabilidade magnética	[ ]

Logo, observando a equação 12, o aumento da condutividade elétrica e da frequência levam à redução da distância de penetração. A constante de atenuação também pode ser expressa em termos das propriedades do meio. A equação 13 apresenta a constante de atenuação para materiais com altas perdas (MEHDIZADEH, 2015).

$$\alpha = \sqrt{\frac{\omega^2 \mu \varepsilon_r'' \varepsilon_0}{2}} \quad (13)$$

Por outro lado, em muitas aplicações a onda eletromagnética se propaga em meios onde  $(\varepsilon_r''/\varepsilon_r')^2 \ll 1$ , como poliamidas, nylon e outros. Para esses meios, a profundidade de penetração é obtida através da equação 14 (MEHDIZADEH, 2015).

$$D_p = \frac{C \sqrt{\varepsilon_r'}}{2\pi f \varepsilon_r''} \quad (14)$$

Onde:

$C$	Velocidade da onda no meio	[m/s]
-----	----------------------------	-------

A constante de atenuação para esses meios pode ser calculada através da equação 15.

$$\alpha = \frac{f \varepsilon_r''}{C \sqrt{\varepsilon_r'}} \quad (15)$$

Essas equações são importantes, pois correlacionam a frequência de aplicação do sensor, as propriedades do material entre o sensor e o leitor e a distância de comunicação (MOORE, 1967). Como a aplicação almejada neste trabalho é o uso de um dispositivo embaixo d'água, a profundidade de penetração para a água do mar, com condutividade de 4 S/m é de 68 mm em 13.56 MHz (POZZEBON, 2015). Outros trabalhos, (WEINER; DEKKER, 2006), analisaram a água do mar com condutividade de 5 s/m e obtiveram uma profundidade de penetração em torno de 60 mm. Dessa forma, a aplicação deste dispositivo está diretamente ligada às distâncias de projeto, com a finalidade de sempre garantir que ocorrerá a incidência de fluxo magnético no sensor e funcionamento deste.

#### 2.3.4 A Proximidade do Metal e a Blindagem Magnética

A aplicabilidade de bobinas que operam em altas frequências sobre superfícies metálicas pode ser questionada, uma vez que, de acordo com a lei de Faraday, a incidência de um campo

magnético alternado sobre uma superfície condutora leva à geração de um campo elétrico, à movimentação de cargas livres e à geração de correntes de Eddy, ou correntes parasitas. A existência destas correntes gera um campo magnético secundário e com o sentido contrário ao campo magnético do leitor, podendo causar redução da distância de leitura e até o não funcionamento do dispositivo. Além do fato da variação de indutância do dispositivo e consequentemente alteração de frequência de ressonância (FINKENZELLER, 2010).

Materiais de engenharia, como alguns materiais ferromagnéticos, auxiliam na redução dos efeitos causados pela proximidade de superfícies metálicas realizando uma blindagem magnética. Em geral, a classificação de materiais magnéticos ocorre em função da permeabilidade magnética relativa do material, valores consideravelmente superiores a um são ditos ferromagnéticos. Esta denominação ocorre em materiais que possuem elevado momento magnético, tais como ferro, níquel e cobalto (FINKENZELLER, 2010).

Dentre suas diversas características, destaca-se a capacidade de serem fortemente magnetizados por um campo magnético externo, a retenção de um grau considerável de magnetização, e a capacidade de concentrarem as linhas do campo magnético em seu interior. Esta capacidade justifica sua aplicação entre uma superfície metálica e uma bobina, uma vez que este material concentra as linhas de campo magnético geradas pelo leitor, reduzindo a incidência deste campo na superfície metálica e consequentemente reduzindo a formação de correntes parasitas. A fração reduzida de correntes parasitas que é gerada na superfície metálica produz um campo magnético secundário e este é direcionado e/ou retido pelo material ferromagnético. Assim pode-se dizer que este material realiza um duplo processo de blindagem. A figura 13 apresenta as linhas de fluxo magnético geradas para a) sem metal posicionado atrás do sensor; b) metal posicionado atrás do sensor e geração de correntes parasitas; c) material ferromagnético entre o sensor e o metal.

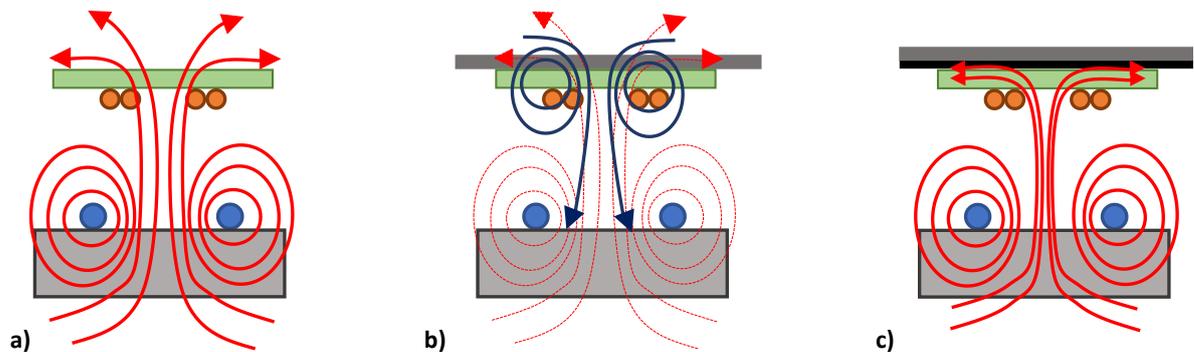


Figura 13 – Linhas de Fluxo Magnético em um Material Ferromagnético. a) Aplicação sem metal posicionado atrás do sensor. b) Aplicação com metal posicionado atrás do sensor e geração de campo magnético secundário. c) Aplicação de ferrite e redução do campo magnético secundário devido ao direcionamento das linha de fluxo.

A *ferrite* é o principal material utilizado em tecnologias de alta frequência. Classificado como um composto cerâmico de óxido de ferro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) com a adição de óxidos metálicos bivalentes ( $\text{NiO}$ ,  $\text{ZnO}$  e  $\text{MnO}$ ), é produzido a partir do processo de sinterização. Pode ser depositado junto a polímeros e, dessa forma, tornar-se flexível. Sua principal característica é a alta resistência elétrica, logo, possui baixíssima condutividade elétrica, levando a uma geração de correntes parasitas muito inferior se comparado a uma superfície metálica convencional. O

valor da sua permeabilidade magnética é uma função da frequência, e este dado é geralmente fornecido pelo fabricante do produto (FINKENZELLER, 2010).

## 2.4 O Estado da Arte para Sensores Ressonantes

Esta seção desempenhará uma função essencial na construção desta pesquisa. Serão abordados trabalhos relacionados à detecção de alteração do meio ambiente com o uso de sensores ressonantes passivos e sensores RFID.

A compreensão desta seção e dos tópicos anteriormente relatados proporcionará a este trabalho ter o embasamento teórico suficiente para avançar para a etapa de desenvolvimento de projeto e construção de protótipo do dispositivo. O intervalo temporal desta revisão abrange desde 2000 até 2020. Além disso, como base de pesquisa são utilizados artigos disponíveis em revistas eletrônicas, dissertações e teses.

Inicialmente serão apresentados trabalhos que utilizam a variação da frequência de ressonância de seu circuito LC para a detecção de alterações no meio a que estão expostos. Ong e Grimes (2000) desenvolveram um sensor baseado neste tipo de conceito de detecção; o equipamento utilizado para a detecção da alteração da frequência de ressonância foi um analisador de impedância e a frequência de operação dos sensores foi em torno de 23 MHz. A detecção da umidade com o auxílio de um capacitor interdigital foi testada para condições extremas de 2% e 98% de umidade relativa e a variação de frequência de ressonância obtida entre estes dois extremos foi de 0,8 MHz. Seguindo a mesma linha de pesquisa, Ong *et al* (2001), melhorou a sensibilidade do sensor com a deposição de um revestimento de óxido de titânio e obteve uma variação da frequência de ressonância com valor de 3,1 MHz entre as condições de 2% e 98% de umidade. Verificou também a redução da frequência de ressonância com o aumento da temperatura do sensor. Um outro dispositivo de monitoramento de umidade foi elaborado por Harpster *et al* (2002); este correlacionava a umidade do meio com o deslocamento da frequência de ressonância do seu sensor. Foi verificado que a frequência de ressonância de seu sensor reduzia com o aumento da umidade, 3 kHz por percentual de umidade, e de forma linear. Também foi verificado que a distância entre o sensor e o leitor possuía influência no valor da frequência de ressonância, limitando a distância de seu dispositivo até 20 mm.

Em seu trabalho, Tan *et al* (2007), descreveu a construção de um dispositivo passivo e sem fio baseado em um circuito LC projetado para detecção de umidade dentro de embalagens de alimentos, com a inteira finalidade de assegurar a qualidade dos alimentos. Com o uso de um analisador de rede foi possível comprovar que seu sensor era capaz de detectar variações de umidade através de variações na frequência de ressonância de seu sensor. Também ressaltou a importância de seu desenvolvimento, pois se trata de um sensor com espessura bem reduzida, flexível e apto a ser inserido em embalagens de produtos. Marioli, Sardini e Serpelloni (2008) aplicaram os conceitos de capacitância parasita para detecção de alterações de umidade utilizando um sensor LC. Seus resultados mostraram de forma significativa reduções da frequência de ressonância de seu sensor com o aumento da umidade, com valor máximo de variação de 0.2 MHz. Além disso, avaliaram o efeito da distância de leitura do sensor até o

valor de 30 mm, obtendo variações inferiores a 1% nos valores de capacitância. Uso de sensores ressonantes para monitorar a presença de água em materiais de construção foi testado no trabalho de Stojanovic *et al* (2010). Uma redução da frequência de ressonância de 1.8 MHz foi observada com o aumento do percentual de água. O sensor provou-se capaz de detectar a presença de água e o aumento do percentual de água.

Dong *et al* (2014) desenvolveu um sensor compacto capaz de detectar alterações de umidade, temperatura e pressão baseado em um circuito LC. A redução de 4 MHz na frequência de ressonância para o intervalo de 15% a 90% de umidade foi observada. Um sensor passivo LC para detecção de umidade foi abordado em Zhang *et al* (2015), com uso de um filme de óxido de grafeno como elemento sensível. Foi possível verificar a redução de frequência de ressonância com aumento da umidade, como também a redução desta com o aumento da temperatura. Um aumento considerável na sensibilidade dos sensores LC pode ser obtido com a deposição de revestimento de óxido de alumínio (MAHBOOB; ISLAM; KHAN, 2016). Mahboob, Islam e Khan (2016) detectaram alterações de umidade inferiores a 1%.

O monitoramento da presença de água na superfície de dutos com sensor LC operando em 100 MHz foi estudado em Zarifi, Deif e Daneshmand (2017), seu dispositivo foi capaz de detectar a presença de água através de uma fina camada de areia. Uma redução de 10 MHz na frequência de ressonância foi observada. A comparação entre um sensor sem revestimento e outro com revestimento cerâmico foi testada no trabalho de Radovanovic *et al* (2018). Ambos os sensores reduziram a frequência de ressonância com o aumento da umidade, para o caso do sensor sem revestimento a variação foi de 5.38 MHz. A comparação entre a sensibilidade dos sensores não pôde ser obtida, já que estes possuíam frequência de ressonância com valores distintos. Martuza *et al* (2018) projetou um sensor de umidade LC passivo com a deposição de camadas de óxido de zinco através da técnica de *sputtering*. O aumento do percentual de umidade gerou redução da frequência de ressonância do sensor. O autor atribuiu uma correlação quadrática ao comportamento do percentual de umidade e a frequência de ressonância. Xie (2019) desenvolveu um sensor LC de umidade de baixo custo baseado em um substrato de papel com a finalidade de incluir este em embalagens de alimentos e remédios. Seu sensor é composto de apenas uma bobina e um substrato. A capacitância parasita entre as espiras é o elemento sensível. Três modelos de sensor foram projetados variando o número de voltas da bobina. Em todos os casos foi observada a redução da frequência de ressonância com o aumento da umidade. Distância de leitura de até 45 mm foram observadas para estes sensores. Dong *et al* (2019) desenvolveu um sensor LC capaz de detectar alterações de pressão e umidade através de capacitores sensíveis a estas grandezas. A detecção de umidade foi auxiliada com a deposição de óxido de grafeno nos eletrodos da estrutura capacitiva. A redução da frequência de ressonância com o aumento da umidade foi verificada.

A capacidade de detecção de umidade com o uso de sensores LC foi comprovada pelos diversos artigos anteriormente citados e continua a ser estudada. Porém, ao realizar a instalação de uma matriz de sensores e/ou realizar a aquisição do sinal por cima de camadas isolantes e/ou revestimentos, surgiu a dificuldade de se confirmar de qual sensor se estava adquirindo o sinal. Assim, a tecnologia RFID é adicionada para complementar e solucionar este tipo de empecilho.

Sua grande adaptabilidade proporciona seu uso, levando a um crescente número de publicações com sensores RFID, como a figura 14 nos apresenta.

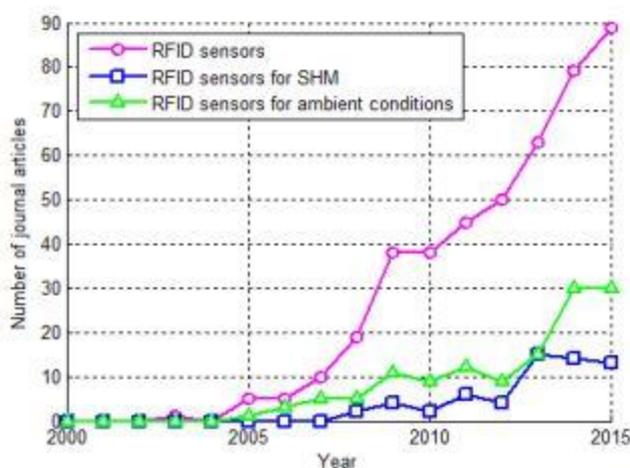


Figura 14 - Crescente aumento de publicações de sensores RFID.  
Fonte: ZHANG et al., (2017).

A versatilidade da tecnologia em conjunto com a possibilidade de operação em diferentes bandas possibilitou a inserção em diversas aplicações (CUI et al., 2019; MENG; LI, 2016). 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, quando ocorre qualquer alteração deste comprimento elétrico, ocorre variação da frequência de ressonância (YI et al., 2011). Logo, é possível correlacionar a frequência de ressonância com a deformação, e/ou deslocamento. A sensibilidade da técnica está correlacionada com a eficiência da transferência de deslocamentos da estrutura submetida ao esforço para o sensor e com a variação da constante dielétrica do substrato do sensor com a deformação (ZHANG et al., 2017). A verificação das alterações de impedância do sensor pode ser feita de maneiras distintas, seja através da potência refletida pelo sensor (MERILAMPI et al., 2011), do coeficiente de reflexão (DALIRI; WANG; ROWE, 2016) e/ou do *Turn on* do sensor (MERILAMPI et al., 2012). Estes sensores em sua grande maioria operaram na banda de UHF, já que pequenas variações no comprimento elétrico nesta banda geram grandes variações de impedância. Seu uso na banda HF é bem restrito e pequenas alterações de impedância podem ser verificadas (BUTLER et al., 2002).

A detecção de trincas com o uso de sensores RFID também foi explorada, uma vez que a fadiga é a causa principal da falha de componentes de engenharia (CAIZZONE; DIGIAMPAOLO, 2015; KALANSURIYA; BHATTACHARYYA; SARMA, 2013; MARINDRA; TIAN, 2018; UHL; LISOWSKI, 2012; ZHANG; TIAN; ZHAO, 2017). Utilizando o mesmo conceito de alteração do comprimento do caminho elétrico devido à existência de um defeito, o valor da frequência de ressonância pode ser analisado. Duas abordagens são verificadas: a primeira na qual a trinca se propaga na estrutura do sensor (KALANSURIYA; BHATTACHARYYA; SARMA, 2013; UHL; LISOWSKI, 2012) e a outra na qual o componente de engenharia monitorado interage com a estrutura do sensor e o defeito

se propaga apenas no componente, mas causa alterações de impedância no sensor (CAIZZONE; DIGIAMPAOLO, 2015; ZHANG; TIAN; ZHAO, 2017).

O processo corrosivo também pode ser detectado com o uso de sensores RFID (ALAMIN et al., 2012; KHALIFEH et al., 2016; ZHANG et al., 2016; ZHANG; TIAN, 2016). 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. O autor justifica que o processo corrosivo altera as propriedades elétricas e magnéticas daquela região da estrutura e gera alterações tensão (ALAMIN et al., 2012; ZHANG et al., 2016).

O monitoramento de parâmetros ambientais com o uso de sensores RFID possui crescente aumento, superando as aplicações para gerenciamento da integridade de estruturas (ZHANG et al., 2017). A detecção de alteração de temperatura e gases foi melhorada graças à ação em conjunto da engenharia de materiais, a qual permitiu agregar a deposição de materiais sensíveis a estes parâmetros na estrutura dos sensores. (LUVISI; PANATTONI; MATERAZZI, 2016; QI et al., 2014). A detecção da variação da concentração de amônia por um sensor UHF pode ser verificada, já que um aumento da concentração de amônia leva à redução da frequência de ressonância com o uso de um sensor revestido de *poly diallyldimethylammonium chloride* (Manzari et al. 2014). Outros revestimentos foram testados. OCCHIUZZI et al., (2011) também estudou o uso de sensores RFID para detecção de amônia. Seu sensor era baseado em nanotubos de carbono, uma vez que a condutividade elétrica destes nanotubos é drasticamente afetada pela presença da amônia. Seu sensor opera na banda UHF e foi capaz de detectar a presença de amônia. YANG et al., (2009) também integrou nanotubos de carbono para detecção de gases tóxicos como amônia e óxido de nitrogênio. Seu sensor RFID UHF detectou facilmente a presença de amônia quando comparado a uma atmosfera de ar.

A quantificação e detecção de umidade com o uso de sensores RFID também foi explorada. JIA et al. (2008) aplicou um filme de poliamida sensível à umidade em uma etiqueta comercial de RFID UHF. Seu estudo mostrou um comportamento linear entre a umidade e a potência necessária para ativar o componente integrado de RFID e uma capacidade de leitura do sensor de 1,5 metros. DENG et al. (2014) desenvolveu um sensor de umidade para ser aplicado em conjunto a um RFID, seu sensor obteve comportamento linear entre capacitância e umidade, e baixo consumo de potência 1,05 uW podendo ser aplicado em *tags* RFID. CHANG; KIM; YOON, (2007) desenvolveu um novo tipo de sensor de monitoramento de umidade com uso de poliamida sintetizada. O aumento da umidade relativa gerou reduções da frequência de ressonância de seu sensor e o autor atribuiu estas reduções ao aumento da permissividade relativa da poliamida.

Neste contexto, Potyrailo, Mouquin e Morris (2008) desenvolveram um sensor capaz de detectar variações de umidade. Seu sensor era composto por uma etiqueta convencional de RFID e um filme quimicamente sensível depositada nesta etiqueta. Este foi um dos primeiros trabalhos onde ocorreu a combinação de um circuito LC e um componente integrado de RFID para a banda de alta frequência. Posteriormente, Oprea et al (2008) projetou etiquetas flexíveis que detectam a presença de umidade com o uso de estruturas IDC e revestimentos poliméricos. Em seu trabalho quantificou a variação de capacitância no sensor em função da umidade

relativa. A detecção de umidade em materiais de construção foi alvo da pesquisa de Wang *et al* (2012), verificando alterações nos parâmetros de impedância foi possível acompanhar a redução da frequência de ressonância com o aumento da umidade. Novamente em Potyailo *et al* (2012), o uso de sensores para verificação da qualidade de alimentos foi aplicado. Variações da posição da frequência de ressonância foram observadas quando ocorria a presença de umidade em regiões próximas ao sensor. O uso de sensores RFID para detecção de variações de umidade e temperatura foram estudados em Salmerón *et al* (2015) e, em ambas as análises, o aumento da temperatura e da umidade levaram à redução da frequência de ressonância. Uma variação de frequência de ressonância de 700 KHz foi obtida na detecção da umidade.

Estudos preliminares por este autor, Kuhn, Jacques e Clarke (2019), foram conduzidos no uso de sensores para detecção de alagamento. Por meio deste estudo foi possível verificar o deslocamento da posição da frequência de ressonância quando ocorre a alteração do meio, tanto para água, petróleo, etileno glicol. Pequenas distâncias de leituras são observadas para este dispositivo, assim como pequenas variações de frequência de ressonância com a temperatura. O dispositivo foi capaz de comprovar a detecção de água sobre o sensor, com uma variação de frequência de ressonância em torno de 3 MHz, como mostrado na figura 15.

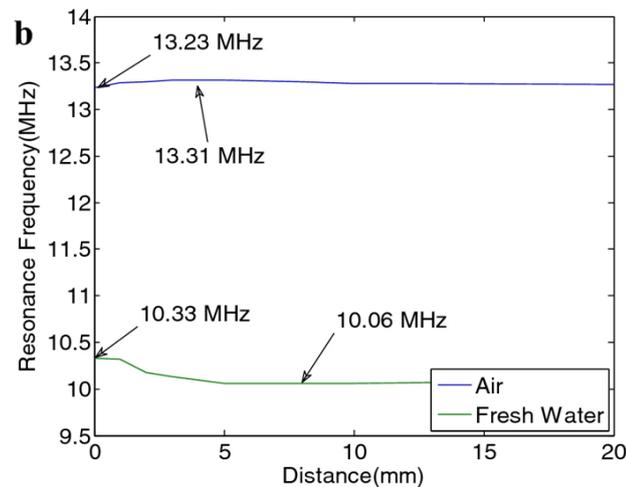


Figura 15 – Valores da frequência de ressonância em função da distância quando exposto em meio ao ar e a água.

Fonte: KUHN; JACQUES; CLARKE, (2019).

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão apresentados os materiais e a metodologia aplicada neste trabalho. A metodologia é composta por: análise pelo método dos elementos finitos; confecção do sensor; teste em escala reduzida; teste em escala média. Cada um dos itens acima citados será mais bem detalhado e exemplificado a seguir. A figura 16 apresenta um fluxograma das atividades desenvolvidas neste trabalho.

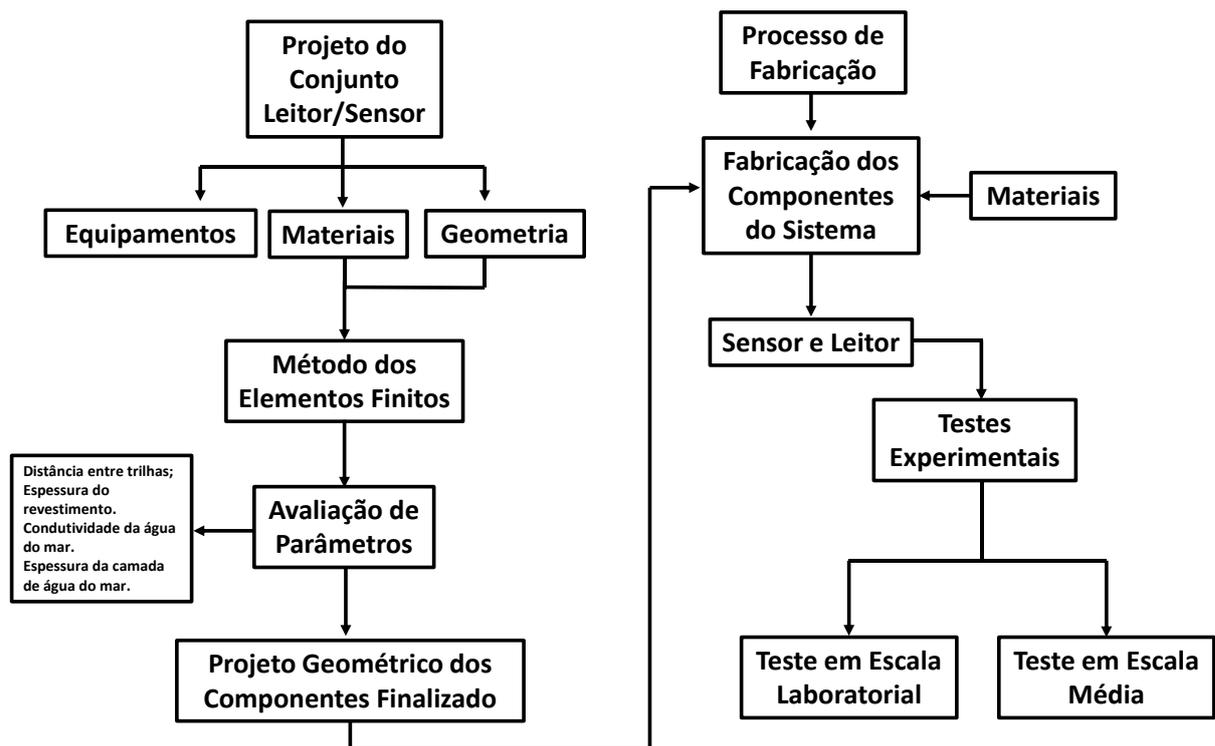


Figura 16 – Fluxograma das atividades desenvolvidas neste trabalho.  
Fonte: Elaborado pelo autor.

#### 3.1 Projeto do Conjunto Leitor/Sensor

Após intensa etapa de estudo bibliográfico, conceitos e fundamentos de dispositivos RFID foram apresentados e serão aplicados no projeto do leitor e do sensor. Definições referentes à geometria, aos materiais e aos equipamentos serão abordados nesta seção.

##### 3.1.1 Geometria

A geometria de um dispositivo RFID está diretamente correlacionada com o local de aplicação. Sensores e leitores podem ser projetados para atender aplicações exclusivas. Conforme anteriormente explicado, este trabalho aborda um dispositivo, no qual um sensor será inserido entre camadas de um duto flexível. Assim, espera-se que este sensor seja flexível para

possibilitar que este se molde à superfície cilíndrica deste duto e, além disso, possua espessura reduzida, para que durante o processo de fabricação seja facilmente inserido entre as camadas do duto e também não represente nenhum tipo de risco à integridade da estrutura. Normalmente, etiquetas RFID que operam em 13.56 MHz possuem dimensões e espessura reduzidas. Assim, a construção de um sensor com a espessura reduzida é uma das características desejáveis no dispositivo e definiu-se o uso de uma geometria de espiral planar.

As características das outras dimensões, como a largura e o comprimento, estão mais ligadas a princípios físicos dos dispositivos, como anteriormente explicado na seção 3.3. Com o uso das equações 2 e 7, foi possível concluir que a melhor condição de acoplamento magnético para aplicação ocorre quando as dimensões do interrogador e sensor são iguais. Dessa forma, utilizou-se de correlações entre a intensidade do campo magnético, o fator de acoplamento e as distâncias entre o leitor e o sensor, para determinar as dimensões dos mesmos. Estas correlações são apresentadas na figura 17. As distâncias propostas de 0,01 m e 0,02 m representam uma e duas espessuras de camada polimérica, respectivamente.

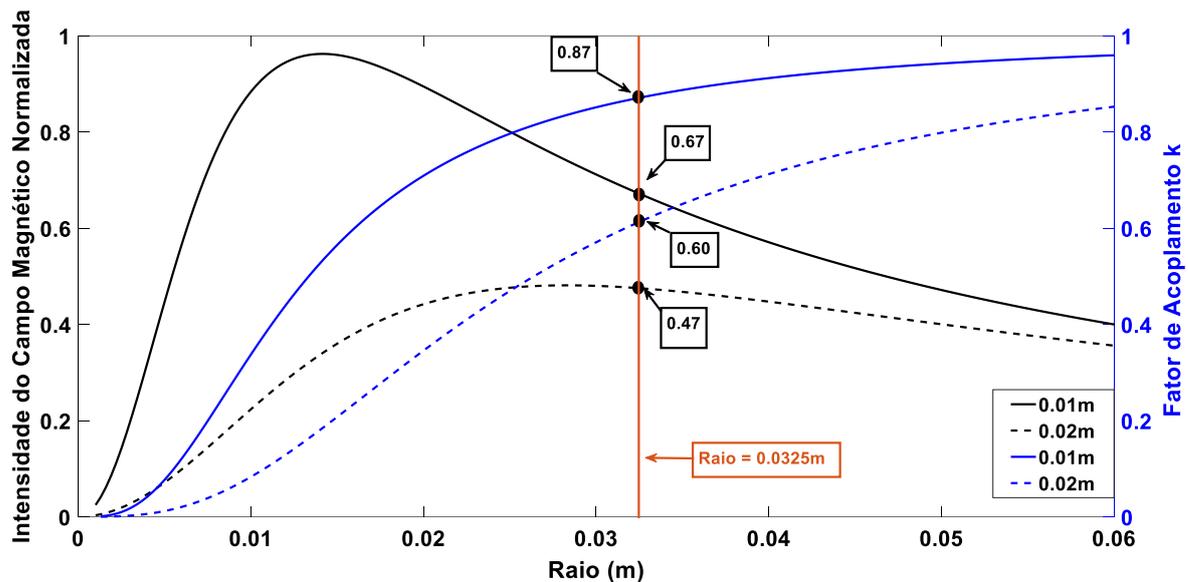


Figura 17 – Correlações entre intensidade de campo magnético, fator de acoplamento e distância entre bobinas para determinação do raio do sensor.

Fonte: Elaborado pelo autor.

De acordo com a figura 17, para a distância de projeto de 0,01 m, linhas contínuas, são obtidos os maiores valores tanto de intensidade de campo magnético como de fator de acoplamento quando comparados à distância de 0,02 m. Logo, o ponto crítico de análise está para situações onde a distância entre as bobinas é 0,02 m. Nas linhas pontilhadas, distância de 0,02 m, verifica-se que para os valores de raio da bobina de 0,02 m até 0,0325 m a intensidade de campo magnético normalizada praticamente se mantém constante, já o coeficiente de acoplamento magnético aumenta seu valor com o aumento do raio. Dessa forma, a definição das dimensões do projeto baseou-se em utilizar o valor de raio onde se obtenha um elevado valor da intensidade do campo magnético e acoplamento magnético. Assim, o valor do raio para a unidade interrogadora e do sensor foi de 0,0325 m.

### 3.1.2 Projeto Geométrico Assistido pelo Método dos Elementos Finitos

Visando redução de tempo no desenvolvimento do dispositivo, uma análise numérica pelo método dos elementos finitos foi aplicada. Esta ferramenta possibilita a análise de parâmetros construtivos do dispositivo de forma eficaz. O objetivo deste modelo numérico é obter um sensor com frequência de ressonância na condição de anular alagado de valor igual a 13,56 MHz. Aplicou-se esta condição, pois é o pior cenário quando comparado à condição de anular seco e em relação à propagação de ondas eletromagnéticas e campos magnéticos. Parâmetros geométricos e ambientais influenciam diretamente no casamento de impedância do conjunto e, por fim, na frequência de ressonância do sensor.

Foram escolhidos os seguintes parâmetros geométricos e ambientais para o estudo, conforme Tabela 4.

**Tabela 4** – Parâmetros geométricos e ambientais estudados.

Parâmetros Geométricos		Parâmetros Ambientais		
Distância entre Trilhas (mm)	Espessura do Revestimento (mm)	Distância entre Sensor e Armadura de Tração e Aplicação da <i>Ferrite</i>	Condutividade da água do mar (S/m)	Espessura da camada de água do mar (mm)
0,10; 0,20; 0,50; 0,75.	0,050; 0,10; 0,15; 0,20; 0,25; 0,30; 0,35; 0,40; 0,45; 0,50.	0,00; 5,00; 10,00; 15,00; 20,00; 30,00;	3; 4; 5; 6.	0,005; 0,010; 0,05; 0,15; 0,25; 0,35; 0,45; 0,55; 0,65; 0,75.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Nesta etapa do projeto a definição dos parâmetros de impedância do dispositivo foi realizada com o auxílio do software *Comsol Multiphysics*. Este software foi escolhido devido à capacidade de obter soluções aproximadas para modelos eletromagnéticos através do uso do Método dos Elementos Finitos. Esta análise consistiu em um estudo no domínio da frequência na física *Magnetic Fields*. Com a finalidade de simplificar o modelo, diversas condições de contorno foram aplicadas, dentre elas:

- *Transition Boundary Condition*: Esta condição é apropriada para camadas de materiais condutivos e com uma espessura relativamente menor que as demais encontradas no modelo. Este caso é o que ocorre com as camadas de cobre depositadas no substrato de FR4. As camadas de cobre foram modeladas com esta condição, aplicando as propriedades de permissividade relativa, permeabilidade relativa, condutividade e espessura real da geometria. Na geração da malha, o domínio de cobre é representado por superfícies, esta manobra permite a redução do número de elementos e consequentemente a redução do número dos graus de liberdade.
- *Lumped Element*: Condição de contorno na qual é aplicado um valor de capacitância, indutância e/ou resistência a uma superfície. O componente de identificação por radiofrequência é modelado como um capacitor com 50 pF. Os resistores presentes no

projeto da bobina da leitora também foram modelados desta forma e ambos com 39 ohm.

- *Lumped Port*: Porta de excitação do modelo, nesta é aplicada uma tensão de 1 volt e ela é caracterizada por uma impedância de 50 ohms.

As propriedades dos materiais utilizados no modelo numérico são apresentadas na tabela 5. Todas as camadas de materiais foram consideradas no modelo numérico. O autor desconsiderou a curvatura da estrutura de duto flexível e planificou o modelo. A figura 18 apresenta as características geométricas do modelo.

Tabela 5 – Propriedades dos materiais utilizados no modelo numérico.

Material	Permeabilidade Relativa	Permissividade Relativa	Condutividade elétrica (S/m)	Tangente de perda	Espessura (mm)
Ar	1,0006	1,0000004	0	0	20
Cobre	1	1	5,998e7	0	0,035
Água do Mar	0,999991	81	4	70	0,7
Poliamida	1	4,3	0	0,004	20
<i>Ferrite</i>	120	12	0	0	0,3
FR4	1	4,5	0	0,02	0,2
Aço	100	1	4,032e6	0	5
Poliuretano	1	4,2	0	0	0,15

Fonte: Elaborado pelo autor.

O processo de discretização da estrutura pelos elementos finitos baseou-se na aplicação de elementos na forma de prisma triangular, formulação quadrática, para os domínios com pequenas espessuras, como, por exemplo, o substrato de FR4 e elementos tetraédricos para regiões mais espessas, como as camadas poliméricas. Além disso, estes elementos possuem funções de interpolação quadráticas com a finalidade de obter um melhor ajuste.

O primeiro passo de análise aplicado no modelo numérico foi a realização de um teste de convergência de malha. O teste de convergência de malha consiste em realizar a redução do tamanho dos elementos finitos de uma região de análise específica até o momento em que a variação do resultado obtido no modelo esteja dentro de uma tolerância previamente estipulada. Muitas vezes o aumento no número de elementos devido à redução de tamanho destes gera resultados mais precisos, porém, a variação destes resultados pode ser insignificante frente ao aumento considerável no recurso computacional aplicado. Logo, deve-se definir de forma adequada o valor de variação desejada (RAO, 2011). Com esta análise é possível obter o número de elementos e o tamanho ideal destes elementos, otimizando recursos.

Nesta análise serão obtidos dois resultados: o comportamento do parâmetro S11 em função do número de elementos e o comportamento do parâmetro S11 em função do tamanho destes elementos. Cabe ressaltar que o controle do tamanho dos elementos foi aplicado em uma região específica do modelo e não em todo o modelo, devido à capacidade computacional.

As camadas do modelo nas quais o teste de convergência de malha foi aplicado estão destacadas e ampliadas por um círculo em vermelho na figura 18, excluindo desta análise a camada de poliamida. Para esta análise a tolerância foi de 0,01 MHz, ou seja, para valores menores de variação de frequência considerou-se que não houve variação. O intervalo de frequência analisado foi de 12,00 MHz até 17,00 MHz com um passo de 0,005 MHz.

A geometria da bobina da unidade leitora pode ser verificada na figura 19-a) e a geometria da bobina do sensor pode ser verificado na figura 19-b).

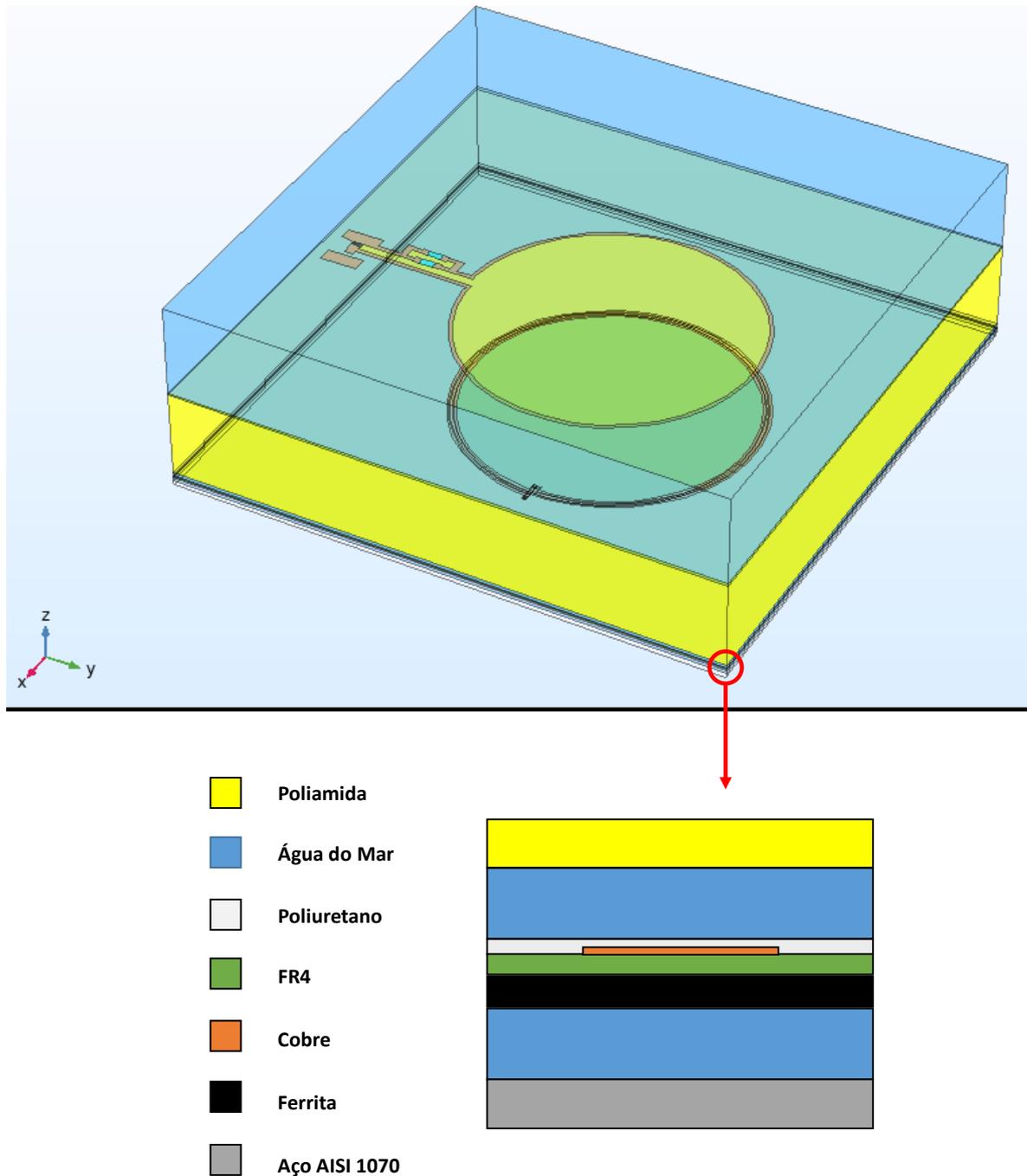


Figura 18 – Características geométricas do modelo numérico.  
Fonte: Elaborado pelo autor.

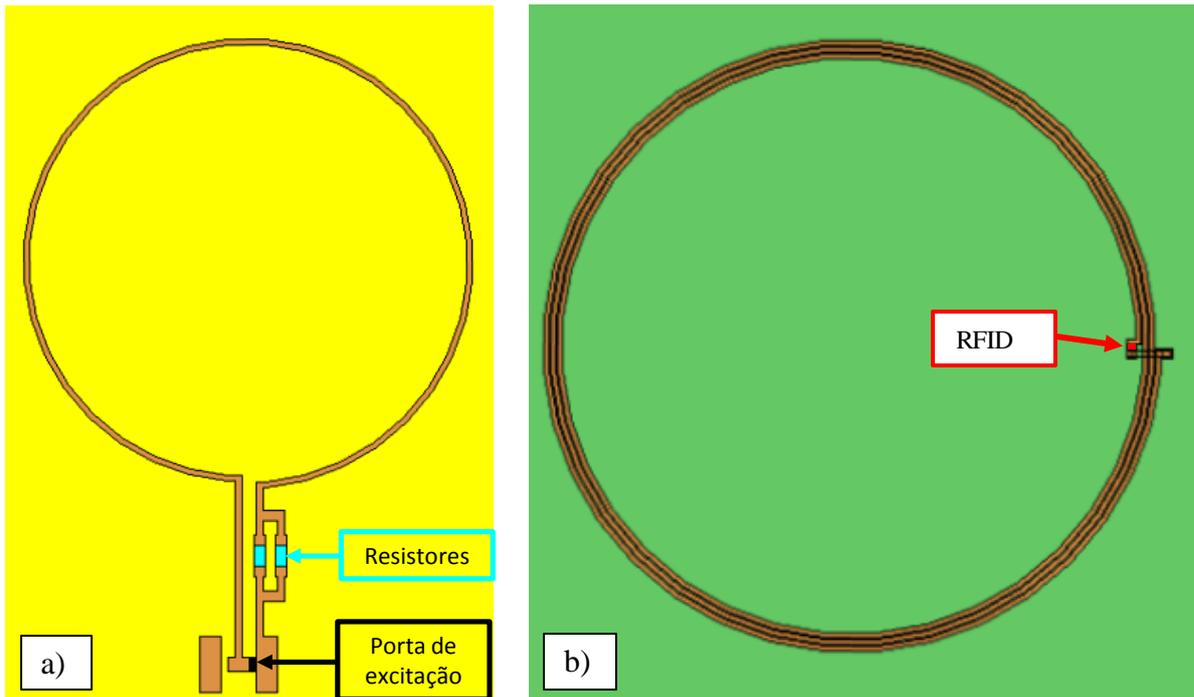


Figura 19 – a) Geometria Bobina Leitor; b) Geometria Bobina Sensor.  
Fonte: Elaborado pelo autor.

## 3.2 Equipamentos e Materiais

Nesta seção serão abordados os equipamentos e materiais utilizados na construção do protótipo do dispositivo.

### 3.2.1 Equipamentos

O processo de fabricação do sensor e leitor foi conduzido com o uso de uma prototipadora com tecnologia CNC para produção de protótipos de placas de circuito impresso e destinadas a projetos em RF e micro-ondas. Este equipamento é responsável por usinar e fresar as geometrias das bobinas de cobre de acordo com o projeto obtido pelo Método dos Elementos Finitos. A figura 20-a) apresenta a prototipadora, modelo LPKF S63, usada no processo de fabricação. Para aquisição da magnitude do parâmetro S11 foi utilizada a placa PXIe-5630 *National Instruments*, a qual é um analisador vetorial de rede que possui faixa de frequência de 10 MHz a 6 GHz. Além disso, um procedimento de calibração foi aplicado com o uso de um kit de calibração automático que permite a calibração do analisador de rede na faixa de frequência de 70 KHz a 9 GHz. A PXIe-5630 pode ser visualizada na figura 20-b).

O equipamento para a identificação dos sensores foi um leitor comercial de RFID, modelo U13B, como mostrado na figura 21-a). Este equipamento é conectado através de cabo USB a um computador que recebe os dados da identificação de cada sensor. O leitor comercial foi resinado com a finalidade de garantir a resistência mecânica e o isolamento da água. Dois tipos de isolamento foram aplicados, inicialmente a resina Epóxi RCC EX 177 e posteriormente

um emborrachamento a frio, Plasti Film fabricado por Quimatic Tapmatic. A figura 21-b) apresenta a configuração final do leitor comercial.

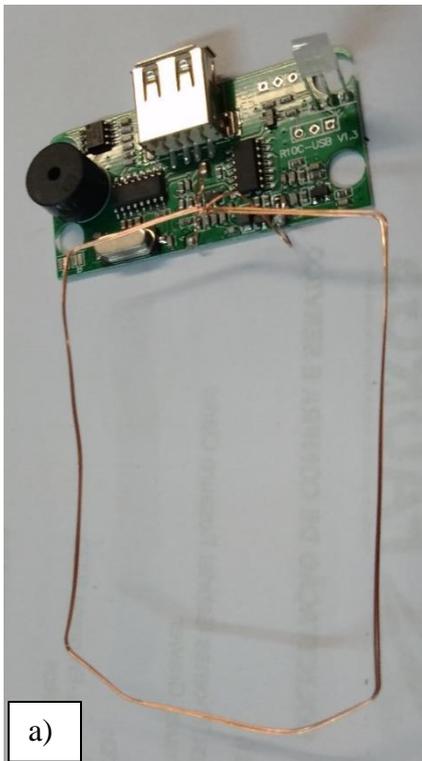


a)



b)

Figura 20 – a) Prototipadora; b) Placa de aquisição NI PXIe-5630.  
Fonte: Elaborado pelo autor.



a)



b)

Figura 21 - a) Leitor comercial RFID; b) Leitor RFID resinado.  
Fonte: Elaborado pelo autor.

### 3.2.2 Materiais

Materiais de engenharia desempenham um papel fundamental na construção dos sensores e de corpos de prova. A possibilidade de aplicação destes materiais ocorre em função de suas características físicas e químicas. Outros fatores como a disponibilidade e o custo destes impactam na decisão da escolha. Assim, esta seção irá abordar os materiais escolhidos e aplicados nas etapas de construção dos componentes do dispositivo e corpos de prova. Os materiais aplicados na construção do protótipo são:

#### Unidade leitora

- Substrato do material FR4, o qual é um material compósito constituído de fibra de vidro e resina epóxi, possui alta resistência mecânica. Onde também possui depositado uma fina camada de cobre, com espessura de 0,035 mm;
- Dois resistores de 39 ohms;
- Laca de poliuretano, PU140. Este material fornece proteção para impactos físicos e químicos, aconselhado para proteção contra a umidade, atmosferas salgadas, óleos e lubrificantes. O PU140 possui cura a temperatura ambiente e faixa de temperatura de operação entre -40°C a 140°C (HBM, 2019);
- Cabo coaxial RG 59 com conector SMA.

#### Sensores

- Substrato de FR4 com espessura de 0,2 mm e 0,035 mm de cobre.
- Componente integrado de identificação por radiofrequência, NT3H2111\_2211, capacitor interno de 50 pF, ISO/IEC 14443, temperatura de operação -40°C a 105°C;
- Resina Isolante – PU140;
- Placa de *ferrite* flexível, espessura de 0,3mm e permeabilidade magnética de 120 em 13.56MHz;
- Revestimento de Poliéster e Polietileno com espessuras de 125 microns.

#### Materiais aplicados no desenvolvimento dos ensaios:

- Cuba de Acrílico para ensaio em escala laboratorial;
- Cuba de Acrílico para ensaio em média escala;
- Segmentos da armadura de tração de duto flexível;
- Segmentos de camadas poliméricas de duto flexível;
- Água do mar Sintética segundo norma ASTM D1141-98;
- Segmento de duto Flexível.

### 3.3 Ensaios Experimentais

Esta seção irá descrever como os ensaios experimentais foram realizados. Inicialmente, um ensaio em escala laboratorial foi aplicado para comprovar a capacidade de o dispositivo detectar a presença de água. Posteriormente a isso, o ensaio em escala média foi aplicado com

a finalidade de obter resultados mais fidedignos à aplicação real. A influência da temperatura na frequência de ressonância do sensor também foi analisada.

### 3.3.1 Ensaio em Escala Laboratorial

O sensor e o leitor foram posicionados no interior de uma cuba de acrílico e as estruturas convencionais de dutos flexíveis, como camadas poliméricas e armaduras de tração foram dispostas em suas respectivas posições. A figura 22 apresenta a configuração do ensaio em escala laboratorial. A água do mar sintética foi produzida de acordo com a norma ASTM D1141-98. As camadas poliméricas realizam a separação entre regiões na cuba, ou seja, a região à direita da figura 22 está sempre preenchida com água do mar sintética, simulando o meio marítimo. Já a região à esquerda, simulava o espaço do anular. O Ensaio consistiu em identificar o sensor e realizar a coleta do parâmetro S11 para a condição de anular seco, ou seja, sem água do lado esquerdo. Após alargar o anular, foi realizada a identificação e coleta do parâmetro S11 novamente. Neste ensaio foram obtidas 30 coletas de sinal para cada condição e configuração do sensor, revestido ou não revestido.

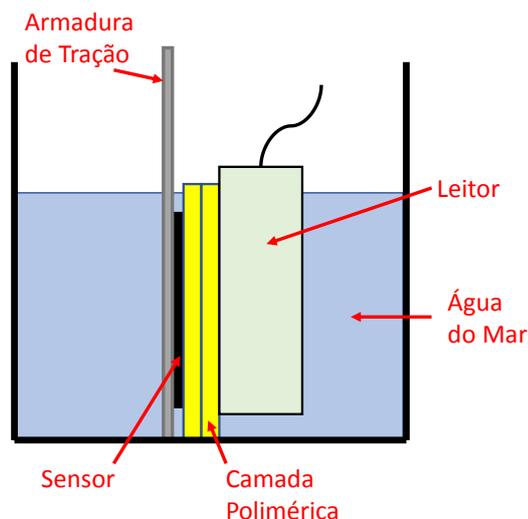


Figura 22- Configuração ensaio em escala laboratorial.  
Fonte: Elaborado pelo autor.

O processo de identificação do sensor foi realizado com um leitor convencional de RFID e o parâmetro S11 foi coletado com o Vector Network Analyzer (National Instruments PXIe\_5630). O intervalo de frequência foi de 12 MHz até 16 MHz com um passo de 0.01 MHz. A calibração do equipamento de aquisição foi realizada no intervalo de frequência e passo anteriormente ditos. Após coleta do parâmetro S11, foram plotados a curva média obtida a partir das 30 curvas coletadas para cada condição. Juntamente a esta, foram plotados os limites máximos e mínimos para todas as aquisições. O valor da frequência de ressonância para cada coleta foi obtido e, dessa forma, a média e o desvio padrão calculados. Também se obteve os valores máximos e mínimos das frequências de ressonância. Munido com todos estes dados, foram realizadas comparações entre a resposta do sensor nas condições propostas.

### 3.3.2 Ensaio em Escala Média

Com a finalidade de aproximar da realidade o ensaio de alargamento do anular, foram conduzidos ensaios em um segmento de duto flexível com diâmetro interno de 6" e comprimento de 1m. A amostra de duto flexível foi posicionada na vertical e então aberturas nas camadas poliméricas foram realizadas para a inserção dos sensores de RFID. Além destes sensores, sensores resistivos foram aplicados para realizar a detecção de água e comprovar através de outro método a presença de água. A figura 23-a) apresenta a amostra de segmento de duto flexível e as aberturas nas camadas poliméricas e a figura 23-b) apresenta o posicionamento dos sensores resistivos e dos sensores resistivos. figura 23-c) apresenta o posicionamento do sensor. Após o posicionamento dos sensores as capas poliméricas foram ressoldadas em suas posições originais.

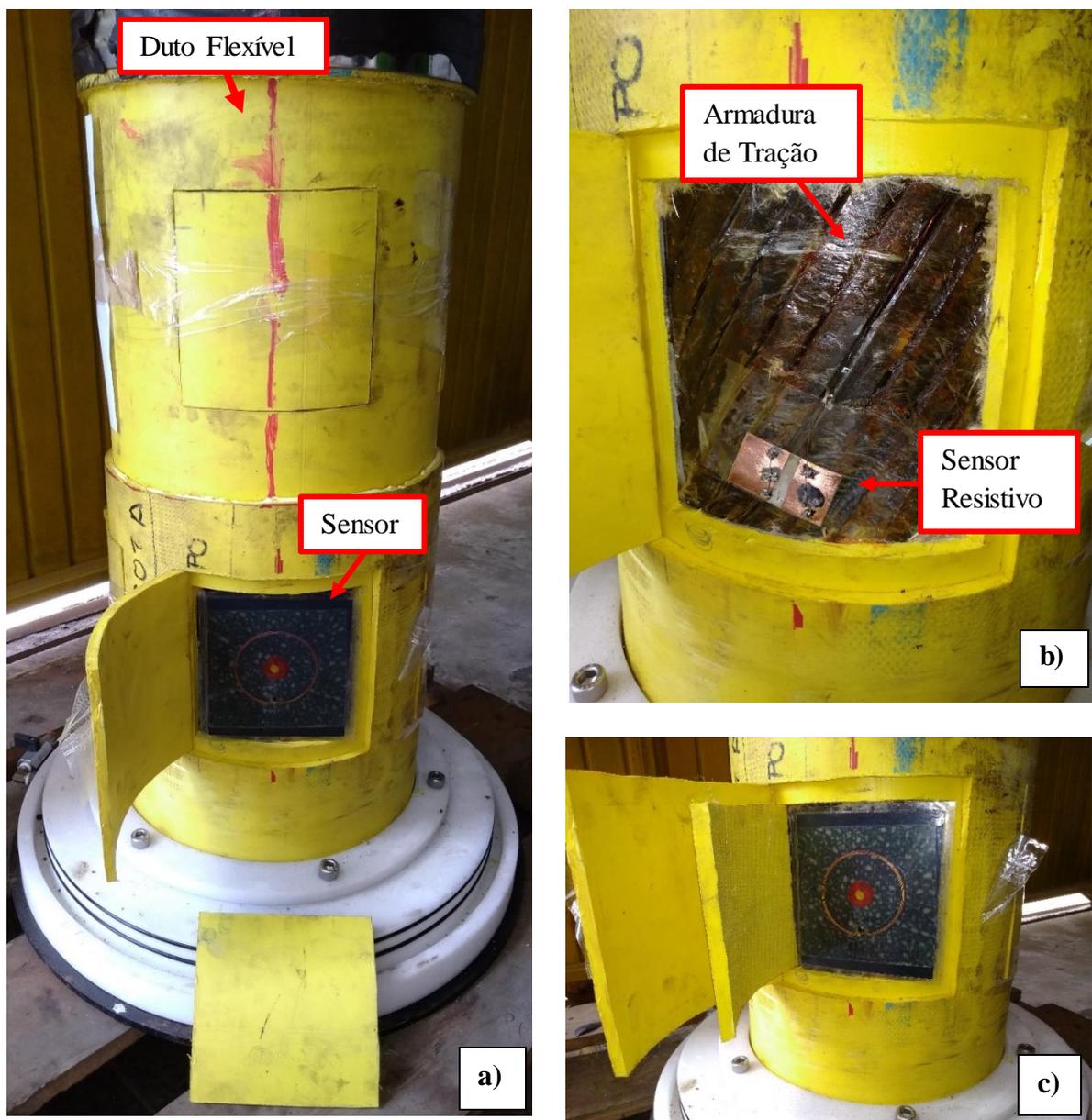


Figura 23 – a) Segmento de duto flexível; b) Sensores resistivos; c) Posicionamento do sensor.  
Fonte: Elaborado pelo autor.

A metodologia do ensaio baseou-se na identificação dos sensores com o leitor convencional de RFID e na coleta do parâmetro S11 com o analisador vetorial de rede para cada sensor em cada condição de ambiente proposta. Foram inseridos oito sensores no corpo de prova, quatro deles com o revestimento de Poliéster e Polietileno e quatro sem revestimento. A figura 24 apresenta o posicionamento dos sensores. Três simulações, ensaios, de alagamento foram realizados. Para cada ensaio foi seguida a metodologia apresentada na figura 25 e, com isso, a média e os desvios padrões foram os resultados obtidos. Com posse destes, os resultados são comparados entre suas condições.

Após um ano, a coleta de dados se repetiu de forma igual à acima explicada. O conceito deste ensaio era verificar se os sensores sofreram alguma degradação ao longo do tempo.

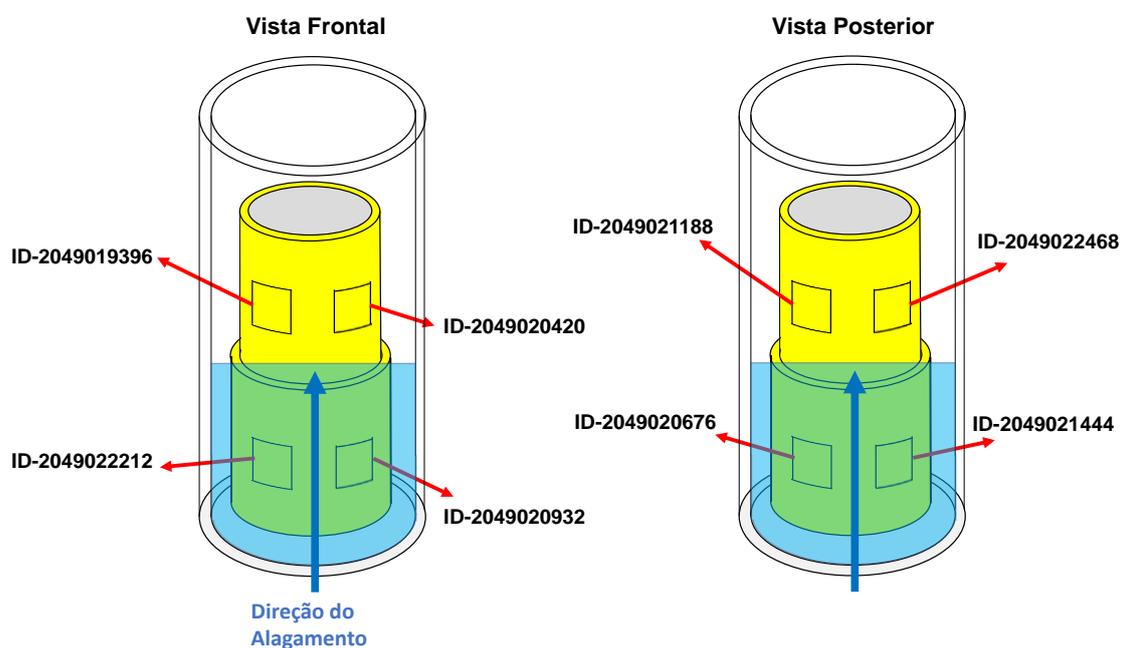


Figura 24 – Posicionamento dos sensores no segmento de duto flexível.

Fonte: Elaborado pelo autor.

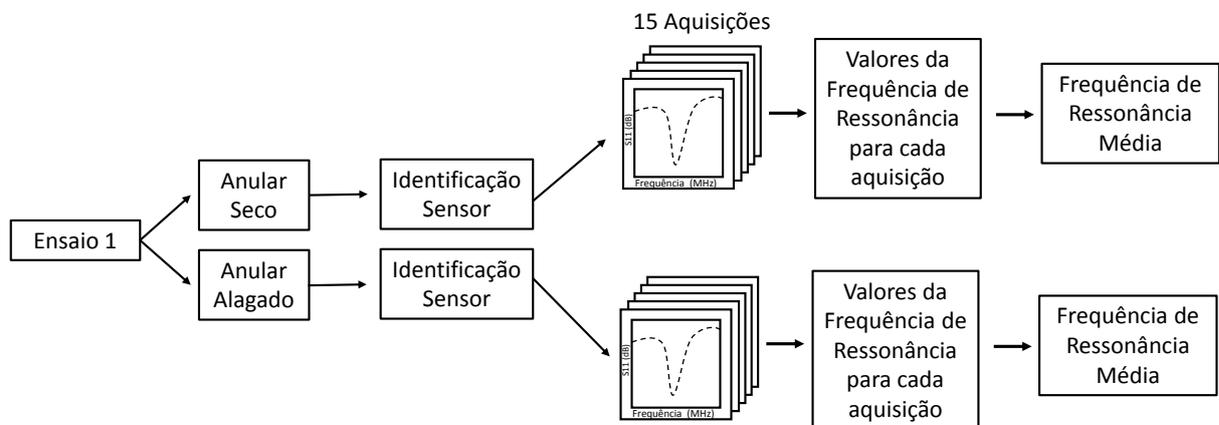


Figura 25 – Metodologia do ensaio.

Fonte: Elaborado pelo autor.

A impossibilidade de obtenção dos valores do parâmetro S11 para os 8 sensores ao mesmo tempo, levou à escolha de um sensor, ID 2049022468, para acompanhamento de seu sinal ao longo do tempo. Para este, três ensaios foram realizados, fixando a bobina leitora no segmento de duto flexível com o uso de uma cinta catraca e coletando os dados ao longo do alagamento. Assim, foi possível correlacionar as magnitudes do parâmetro S11 com o tempo e a frequência de ressonância com o tempo. A figura 26 apresenta o ensaio em escala média, na qual o leitor desenvolvido através da análise por MEF é o dispositivo em branco e o equipamento convencional de RFID é o dispositivo em vermelho. Ambos estão submersos em água do mar sintética.

A figura 27 demonstra a interface do equipamento de aquisição, onde os indicadores em verde representam os sensores resistivos e no quadro inferior à esquerda é mostrado o parâmetro S11 em função da frequência, curva em azul.

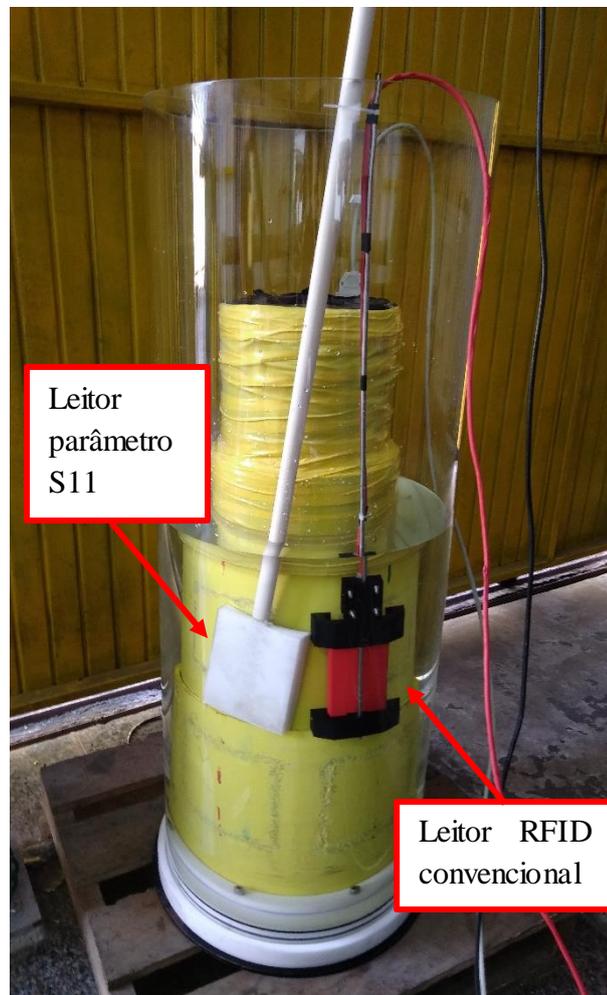


Figura 26 – Ensaio em escala média.  
Fonte: Elaborado pelo autor.



Figura 27 – Interface do software de aquisição de sinais.

Fonte: Elaborado pelo autor.

### 3.3.3 Ensaio da Influência da Temperatura

Materiais e suas propriedades tendem a sofrer variações com a temperatura, sejam elas dilatações, contrações e outras. É conhecido que variações de temperatura geram alterações na frequência de ressonância (FERNÁNDEZ-SALMERÓN et al., 2015; ONG et al., 2001), porém quantificar este valor pode ser fundamental para o sucesso da aplicação deste tipo de sensor de maneira a se anular, ou desprezar, o efeito da temperatura na resposta de sensores e garantir que a resposta do dispositivo não forneça um falso positivo da condição do anular dos dutos flexíveis. Dessa forma, uma análise do efeito da temperatura sobre frequência de ressonância do sensor deve ser aplicada para evitar qualquer equívoco na análise dos resultados.

O Ensaio de temperatura consistiu no posicionamento do sensor e do leitor em uma câmara climática digital, modelo SL-206, marca Solab, figura 28. Dentro do intervalo de 5°C até 55°C foram realizadas coletas do parâmetro  $S_{11}$  nas seguintes temperaturas: 5°C, 15°C, 25°C, 35°C, 45°C, 55°C. Após atingir cada temperatura proposta, o equipamento ficou coletando os dados por um período de 30 minutos. A média da frequência de ressonância foi obtida para cada temperatura proposta. O ensaio foi repetido 3 vezes para cada configuração de sensor, com revestimento e sem revestimento. Após realizado todos os ensaios, foram gerados gráficos correlacionando a frequência de ressonância média e a temperatura para os três ensaios.



Figura 28 – Câmara Climática utilizada nos ensaios de variação de temperatura.  
Fonte: Elaborado pelo autor.

### 3.3.4 Ensaio da Influência da Excentricidade entre o Sensor e o Leitor

A densidade de fluxo magnético é relacionada ao valor de intensidade do campo que passa por uma determinada área. Analisar se o desalinhamento entre a bobina sensor e a leitora gera alteração na frequência de ressonância é fundamental. Nesta análise foram analisados 4 desalinhamentos da bobina leitora, como mostrado na figura 29, na qual os círculos em azul são as posições da bobina leitora e o círculo em vermelho seria o sensor. Com o uso do equipamento PXIe-5630, foram adquiridos os valores do parâmetro S11 em função da frequência, quinze vezes para cada posição da bobina. Para cada aquisição foi obtido um valor de frequência de ressonância e uma média para cada posição foi realizada. Após os dados de todas as posições e três ensaios de alagamento os resultados foram comparados.

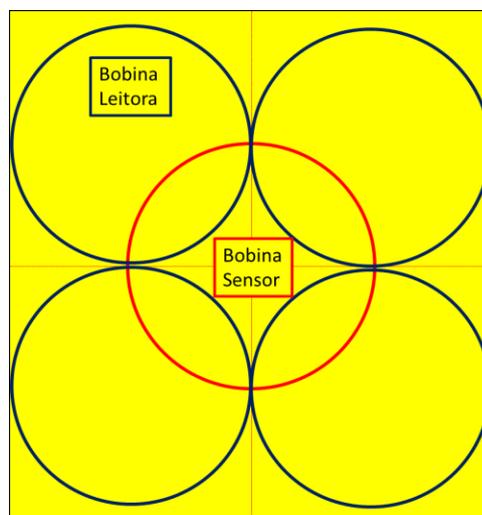


Figura 29 - Setup desalinhamento entre bobina sensora e bobina leitora.  
Fonte: Elaborado pelo autor.

### 3.3.5 Ensaio da Influência da Inclinação entre o Sensor e o Leitor

Da mesma forma que a concentricidade, a inclinação entre o sensor e o leitor foi alvo da análise. Verificar se as diferentes inclinações podem afetar de forma significativa a resposta do sensor, frequência de ressonância, é o objetivo deste ensaio. Nesta análise foram aplicadas 3 sapatas com inclinações de  $10^\circ$ ,  $20^\circ$  e  $30^\circ$  e coletados os dados de parâmetro S11 em função da frequência. Para cada inclinação foram coletados 15 sinais e destes foi realizado o cálculo da média e desvio padrão. A figura 30 ilustra 30-a o esquemático do ensaio e 30-b as sapatatas.

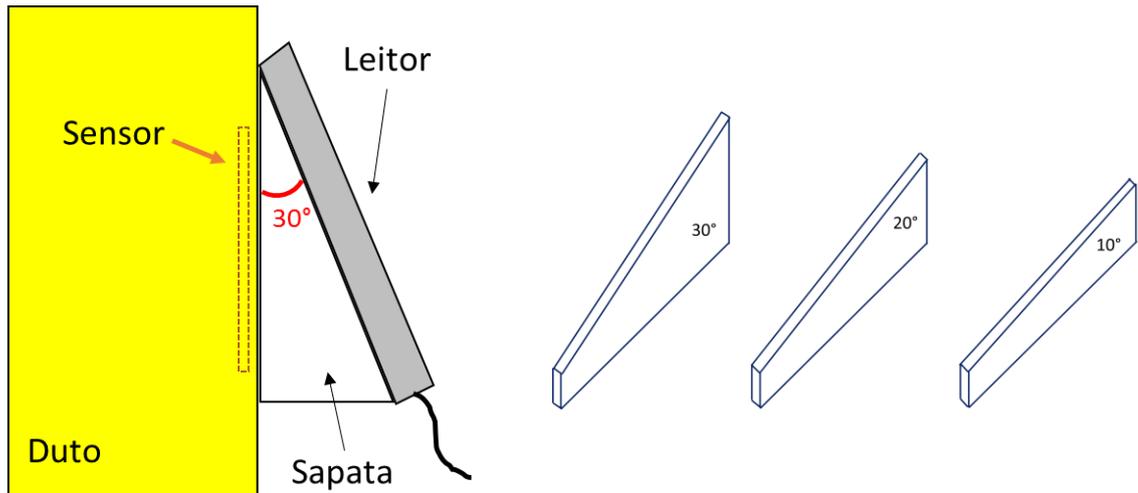


Figura 30 – Esquemático do ensaio da influência da inclinação do leitor. a) Posicionamento entre o leitor e sensor. b) Geometrias das sapatatas aplicadas.

Fonte: Elaborado pelo autor.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos neste trabalho. Inicialmente serão mostrados os resultados referentes ao projeto pelo Método dos Elementos Finitos e em uma segunda seção os resultados experimentais para os ensaios propostos.

### 4.1 Método dos Elementos Finitos

O primeiro resultado gerado por um modelo numérico deve ser um teste de convergência de malha. A figura 31 apresenta o resultado do teste de convergência de malha, ela correlaciona a frequência de ressonância obtida pelo modelo numérico e o número de elementos da malha. Nota-se a variação do valor da frequência de ressonância com o aumento do número de elementos, porém para o número de elementos maiores que 610000 este valor de variação se reduz para valores inferiores a 0,01 MHz, valor estipulado no capítulo de Materiais e Métodos na seção 3.1.2 e, assim, se assume que não houve variação significativa na resposta. A forma da curva obtida neste resultado é semelhante ao encontrado em (LOGAN, 2017; RAO, 2011), caracterizando a convergência do resultado. A variação no número de elementos para uma malha onde o tipo de elemento não é modificado deve-se à redução do tamanho do elemento. Logo, o resultado de uma análise do tamanho do elemento e da frequência de ressonância foi gerado e a figura 32 apresenta este resultado. O tamanho de elemento de 1,25 mm foi definido como tamanho de elemento máximo para convergência de resultado. Na figura 32 verifica-se que com a redução do tamanho dos elementos ocorre aumento da frequência de ressonância até o ponto de convergência e, após este, o valor mantém-se constante dentro da tolerância definida. Com os resultados do modelo de convergência é possível obter resultados confiáveis e com o menor tempo e custo computacional.

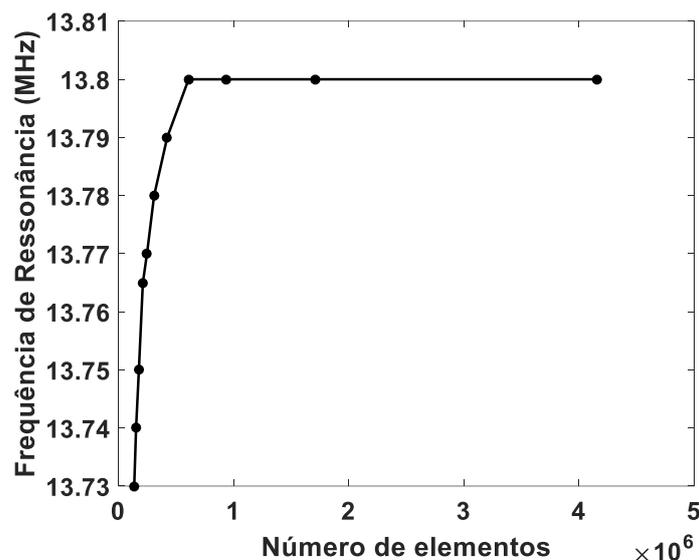


Figura 31 – Teste de convergência de malha – Número de elementos.  
Fonte: Elaborado pelo autor.

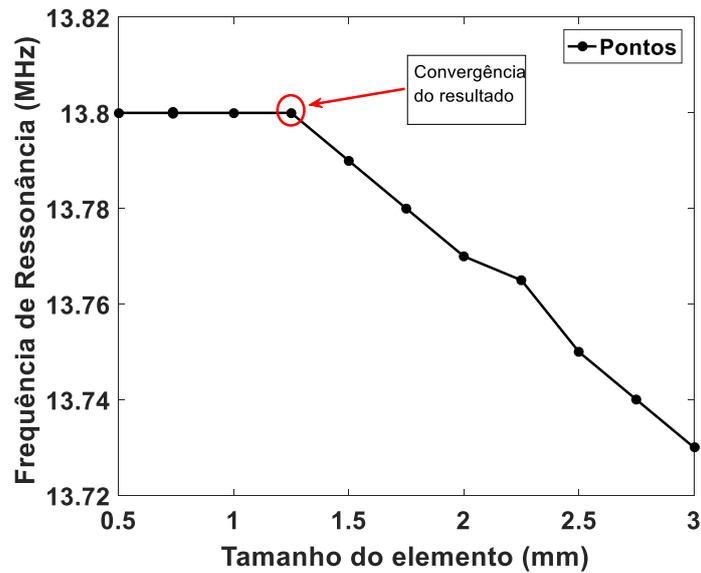


Figura 32 – Teste de convergência de malha – Tamanho do elemento.  
Fonte: Elaborado pelo autor.

Nesta sequência estão presentes os resultados obtidos para os parâmetros geométricos do sensor:

- Distância entre trilhas – A figura 33 apresenta o comportamento do parâmetro  $S_{11}$  com a variação da distância entre as trilhas do sensor. Pode ser verificado que, com a redução da distância, espaçamento entre as trilhas, ocorre redução da frequência de ressonância. Isso se deve ao fato de que, quanto mais próximas estão as trilhas, maior é a indutância da bobina; e um aumento na indutância leva à redução da frequência de acordo com a equação 9. Modificações na intensidade do parâmetro  $S_{11}$  podem ser verificadas, porém nenhuma correlação pode ser definida.

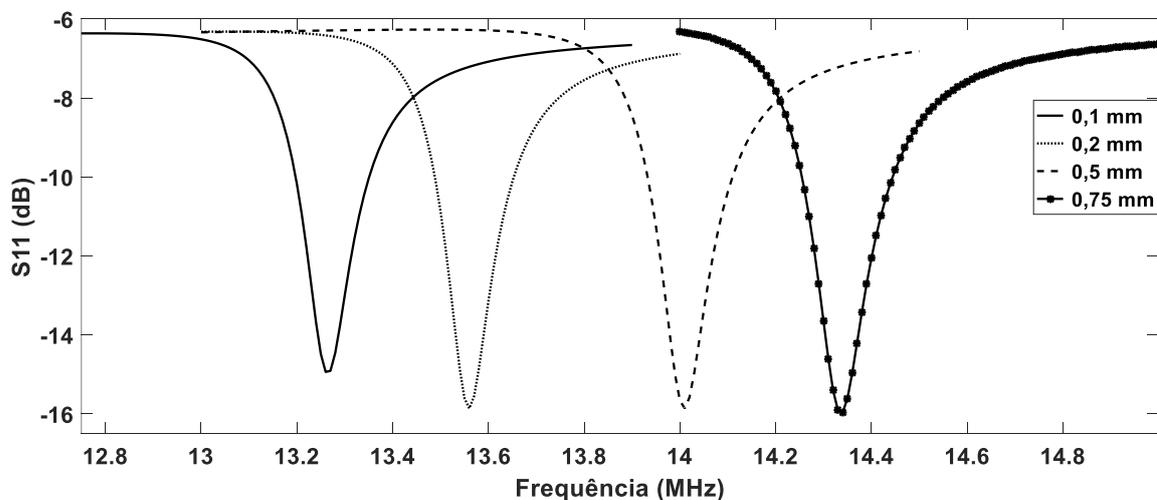


Figura 33 – Comportamento do Parâmetro  $S_{11}$  com a variação da distância entre as trilhas do sensor.  
Fonte: Elaborado pelo autor.

- Espessura do Revestimento - A figura 34 apresenta o comportamento do parâmetro  $S_{11}$  com a variação na espessura do revestimento. Pode ser verificado que maiores espessuras de revestimento levam a menores variações de frequência de ressonância. Logo, a espessura deve ser levada em consideração no projeto do sensor. Interessante ressaltar a influência da presença da água na região inferior do sensor, comprovando que mesmo afastada da bobina do sensor ocorre interação dos parâmetros de impedância com o meio.

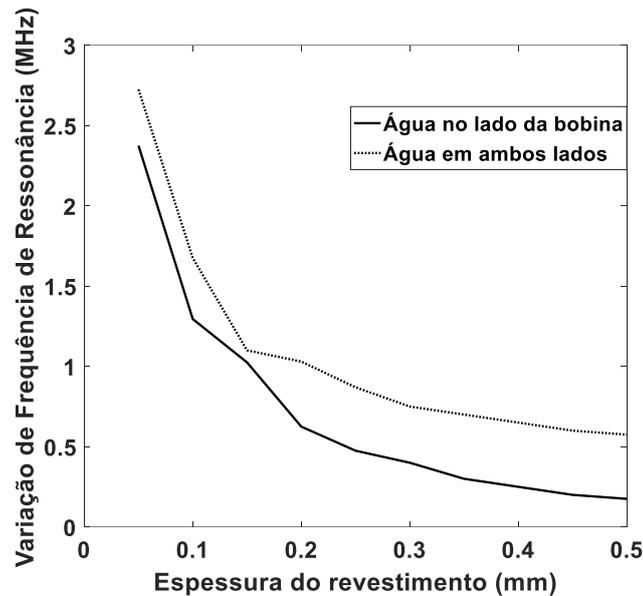


Figura 34 – Comportamento da variação da frequência de ressonância em função da espessura do revestimento aplicado sobre o sensor.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Seguindo a metodologia, os resultados obtidos para os parâmetros ambientais serão descritos abaixo.

- Distância entre sensor e armadura de tração para condições de uso e não uso do *ferrite* entre o sensor e a armadura de tração – A figura 35 apresenta o comportamento do parâmetro  $S_{11}$  com a distância de uma superfície metálica para a condição de sensor diretamente aplicado sobre o metal e para a condição de uma placa de *ferrite* aplicada entre o metal e o sensor. Para ambas as condições pode ser verificada a redução do módulo da intensidade do parâmetro  $S_{11}$  com a aproximação da estrutura metálica. No entanto, para o caso em que ocorre a presença da placa de *ferrite* entre o sensor e a estrutura metálica, a redução da intensidade é bem inferior. Lau (2015) verificou que o uso do ferrite entre o sua bobina e uma placa metálica, permita o funcionamento de seu dispositivo e que a redução de intensidade de sinal era bem inferior. Outro ponto analisado na figura 35 é o valor da frequência de ressonância em função da proximidade entre o sensor e a estrutura metálica. Para o caso onde não há *ferrite*, ocorre grande dessintonização da frequência de ressonância, já com o uso de *ferrite* reduz-se drasticamente a dessintonização, estabilizando o valor da frequência de ressonância para próximo ao almejado na simulação, 13,56 MHz. Cabe salientar a importância de construir um modelo numérico com todas os componentes influentes no sinal do sensor. Com esta análise é possível concluir que o uso de *ferrite* entre o sensor e a estrutura de metal é fundamental para garantir o funcionamento

do dispositivo e evitar grandes dessintonizações devido a possíveis alterações de distância entre o sensor e a estrutura metálica.

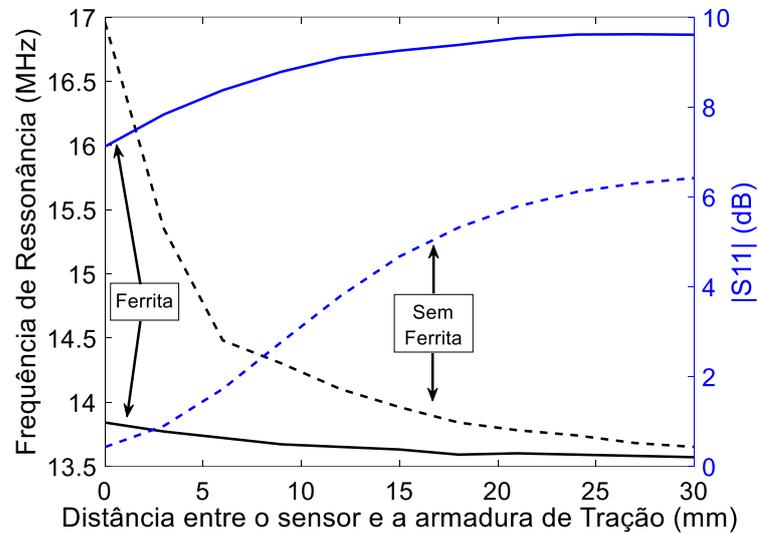


Figura 35 – Efeito da proximidade de uma superfície metálica e o uso do Ferrite.  
Fonte: Elaborado pelo autor.

- Condutividade da água do mar – Os resultados obtidos para a variação da condutividade da água do mar podem ser verificados na figura 36. Pode-se notar que não houve alteração no valor da frequência de ressonância para os valores de condutividade testados no modelo numérico para o passo de frequência de 0,01 MHz. A maior diferença entre os valores da amplitude do parâmetro  $S_{11}$  foi de 0,28 dB. Dessa forma, pode-se concluir pela análise do modelo numérico que a variação da condutividade da água não gera alteração significativa no sensor. Os valores da frequência de ressonância e amplitude são apresentados na tabela 6.

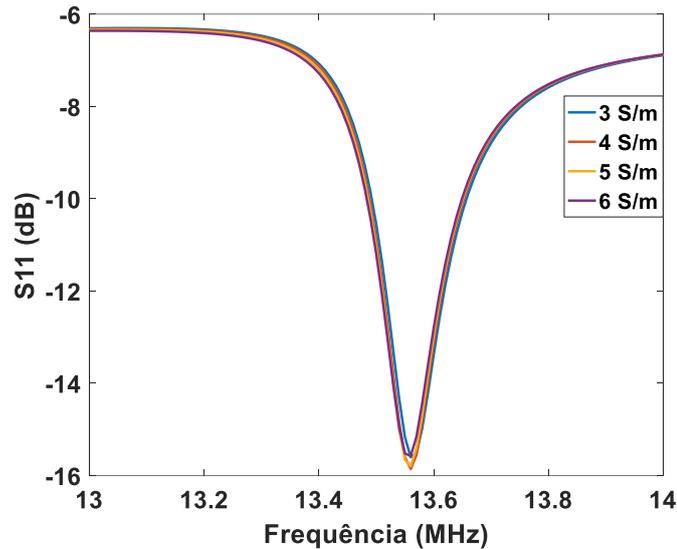


Figura 36 – Parâmetro  $S_{11}$  em função da condutividade da água.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 6 – Frequência de Ressonância e Amplitude  $S_{11}$  em função da condutividade.

Condutividade (S/m)	Frequência de Ressonância (MHz)	Amplitude $S_{11}$ (dB)
3	13,56	-15,60
4	13,56	-15,86
5	13,56	-15,80
6	13,56	-15,58

Fonte: Elaborado pelo autor.

- Espessura da camada de água sobre o sensor – A figura 37 apresenta o comportamento do parâmetro  $S_{11}$  com relação à espessura da camada de água posicionada acima do sensor. Pode ser verificado que com a redução da espessura da camada de água até o valor de 0,15 mm ocorre singelo aumento da frequência de ressonância. Porém, para valores de camada inferiores a este, o valor de frequência de ressonância aumenta de forma mais abrupta. Com o modelo numérico foi possível analisar o valor de frequência de ressonância para camadas de até 0,005 mm de espessura, sendo que para esta obteve-se um valor de frequência de ressonância de 13,69 MHz. Valores de espessura inferiores a 0,005 mm levaram à falta de recurso computacional e resultados não puderam ser obtidos.

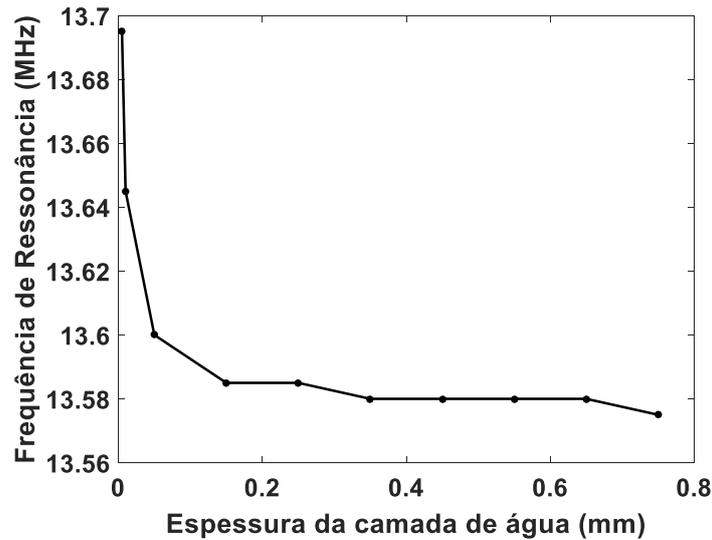


Figura 37 – Comportamento da Frequência de Ressonância em função da espessura da camada de água na região superior do sensor.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Após a obtenção dos resultados de diversos parâmetros que influenciam na frequência de ressonância do sensor, iniciou-se o projeto do conjunto leitor/sensor. O sensor deverá ter sua frequência de ressonância em 13,56 MHz na condição de anular alagado. Neste modelo foram utilizados os seguintes parâmetros, obtidos na análise pelo método dos elementos finitos.

- Espessura de camada de revestimento de 0,15 mm;
- Presença de camada de água do mar com espessura de 0,7 mm em ambos os lados do sensor;
- Condutividade da água do mar de 4 S/m.

Assumindo as características acima citadas no modelo, os parâmetros geométricos que resultaram no sensor e no leitor são apresentados na tabela 7.

Tabela 7 – Parâmetros Geométricos para o conjunto Leitor/Sensor.

	Raio (mm)	Largura da Trilha (mm)	Número de voltas	Espaçamento entre voltas (mm)
Leitor	32,5	0,8	1	-
Sensor	32,5	0,5	3	0,2

Fonte: Elaborado pelo autor.

Dessa forma, a resposta do parâmetro  $S_{11}$  para esta configuração de geometria pode ser verificada na figura 38, na qual se obteve uma amplitude de -15,7 dB e uma frequência de ressonância de 13,56 MHz para o modelo numérico na condição de anular alagado e um valor de frequência de ressonância de 14,66 MHz com uma amplitude de -46 dB para a condição de anular seco. Também pode ser visualizada na figura 39 a densidade de fluxo magnético gerado no sensor na frequência de 13,56 MHz. As flechas em cor preta são vetores representando as linhas do fluxo magnético. Nota-se o compartilhamento destes vetores entre as duas bobinas, ou seja, o acoplamento magnético entre as bobinas.

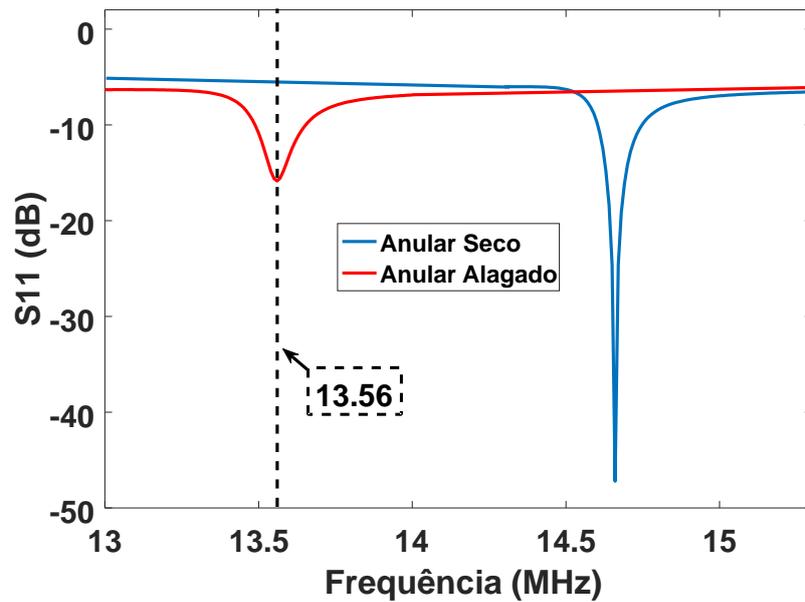


Figura 38 – Resultados numéricos para o parâmetro  $S_{11}$  para condição de anular seco e anular alagado.

Fonte: Elaborado pelo autor.

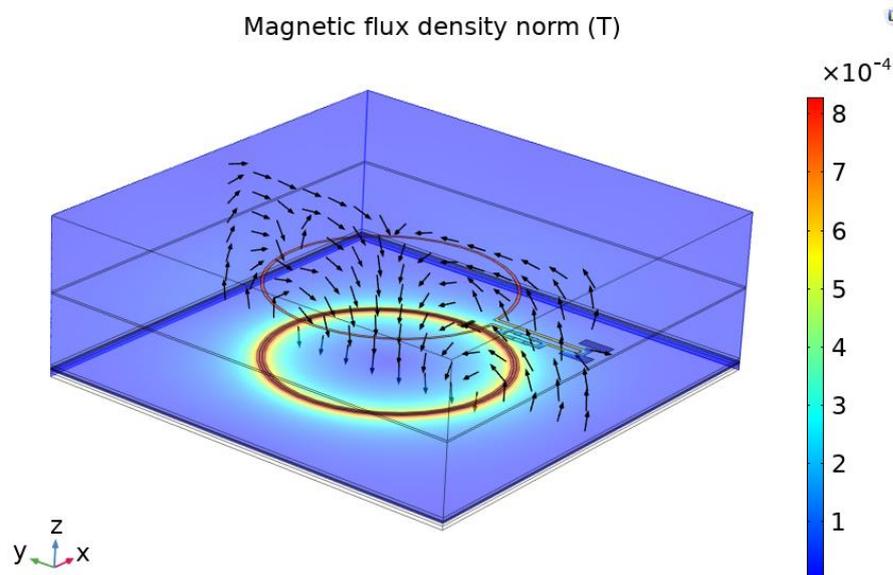


Figura 39 – Densidade e vetores de campo magnético obtidos no modelo numérico.

Fonte: Elaborado pelo autor.

## 4.2 Ensaio em Escala Laboratorial

Nesta seção serão apresentados os resultados obtidos para os ensaios em escala laboratorial. A figura 40 apresenta as curvas obtidas para condição de anular seco e molhado para o sensor com revestimento. As linhas pontilhadas representam os limites superior e inferior obtidos para as 30 coletas e a curva em vermelho a média dessas curvas coletadas. O valor da

média da frequência de ressonância para as 30 coletas foi de 14,42 MHz e o desvio padrão foi de 0,0186 MHz. Verificando os valores dos extremos, obteve-se 14,45 MHz e 14,38 MHz.

Na figura 40-b) nota-se o deslocamento da frequência de ressonância de 0,46 MHz. Uma ligeira redução na intensidade de sinal do parâmetro  $S_{11}$  pode ser verificada se comparada à condição de anular seco. O valor médio da frequência de ressonância obtido foi de 13,96 MHz e o desvio padrão foi de 0,0151 MHz. Verificando os valores dos extremos, obteve-se 13,99 e 13,95 MHz.

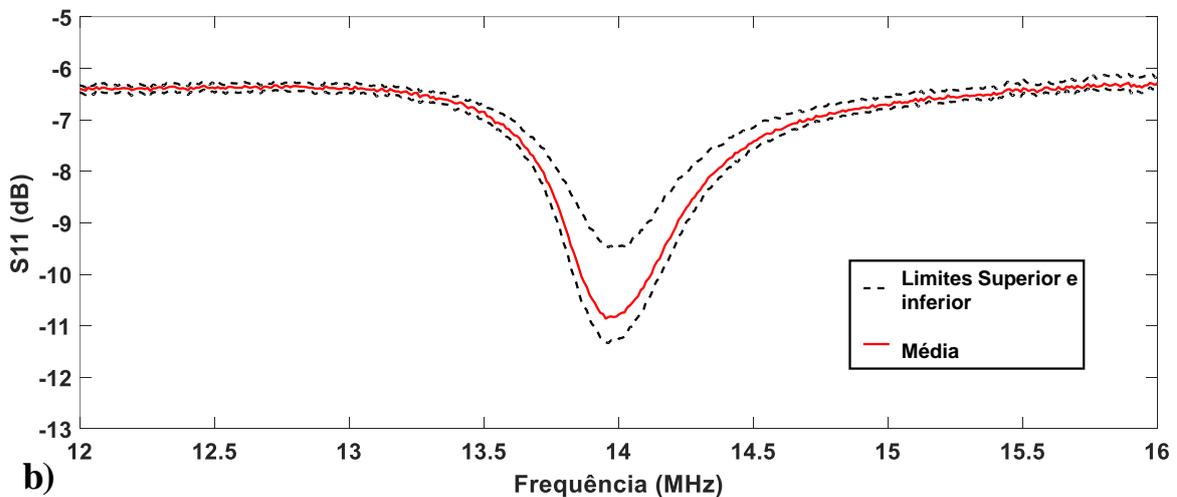
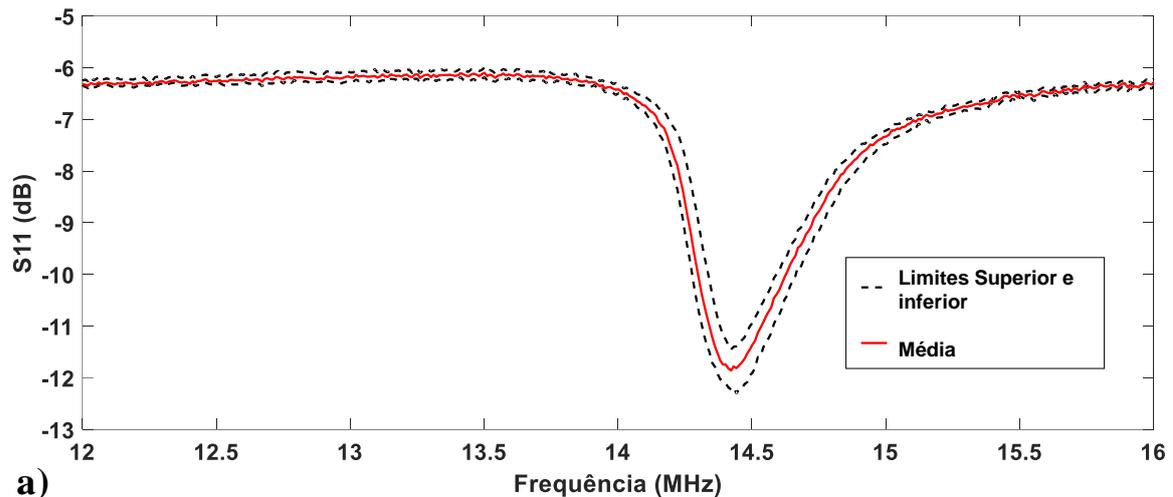


Figura 40 – Parâmetro  $S_{11}$  para condição do sensor com revestimento. a) anular seco. b) Anular alagado.

Fonte: Elaborado pelo autor.

O resultado para o sensor sem revestimento, nas condições de anular seco e molhado, pode ser visualizado na figura 41. Nota-se uma maior dispersão entre os limites superior e inferior quando comparados ao sensor com revestimento. A média da frequência de ressonância foi de 14,30 MHz e o desvio padrão de 0,0265 MHz. Os valores de frequência de ressonância para os casos mais extremos foram 14,35 MHz e 14,21 MHz. A amplitude do parâmetro  $S_{11}$  foi semelhante para ambos os casos, revestido e não revestido. Os resultados para a condição de anular alagado para o sensor sem revestimento podem ser visualizados na figura 41 b), na qual pode ser observado um deslocamento da frequência de ressonância de 0,62 MHz, semelhante

ao do sensor revestido. O valor médio da frequência de ressonância obtido foi de 13,73 MHz e o desvio padrão foi de 0,0132 MHz. Verificando os valores dos extremos, obteve-se 13,76 MHz e 13,71 MHz.

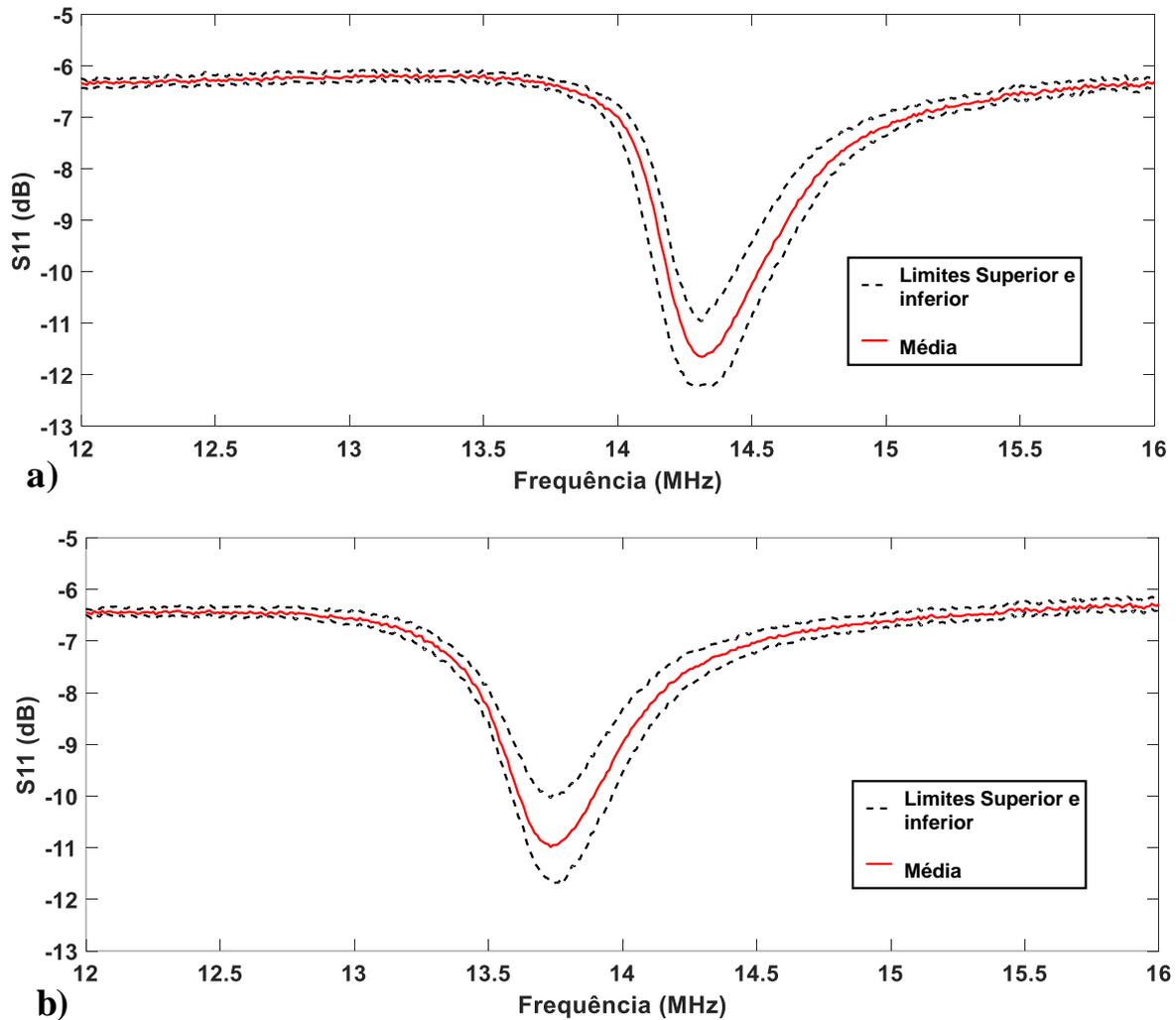


Figura 41 – Parâmetro  $S_{11}$  para condição do sensor sem revestimento. a) anular seco. b) Anular alagado.

Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir do resultados obtidos nos ensaio em escala laboratorial, verificou-se a capacidade de detecção da presença de água no entorno do sensor, como também a possibilidade de aquisição do sinal a uma distância de duas espessuras de camadas de poliamida, 20 mm. Os resultados de variação da frequência de ressonância para os sensores foram bem inferiores ao resultado obtido no modelo numérico. Porém, apenas com um ensaio mais real seria possível verificar as potencialidades efetivas desta técnica, já que o espaço do anular é difícil de ser representado em uma cuba de acrílico.

### 4.3 Ensaio em Escala Média

Os resultados para os ensaios em escala média podem ser verificados nas figuras 42-45. As curvas médias das leituras adquiridas estão representadas em vermelho; os sinais das

aquisições estão em pontilhado preto; e as curvas com a linha preta contínua representam os valores máximos e mínimos obtidos em todas as aquisições. Por meio da visualização das curvas de aquisição em conjunto com a curva da média pode-se inferir que a amplitude do parâmetro  $S_{11}$  possui grande variação entre cada aquisição. Este fato é justificado pelo posicionamento entre o leitor e o sensor, já que uma completa concentricidade entre eles é praticamente impossível, diferente do que ocorre no modelo numérico. A média das frequências de ressonância e seus respectivos desvios padrões podem ser visualizados na tabela 8. A figura 42 apresenta as curvas do parâmetro  $S_{11}$  em função da frequência para as condições de anular seco e alagado do sensor ID 204902118. Cabe lembrar que este sensor está posicionado em uma região do duto onde a distância entre a bobina e o sensor é de uma espessura de camada polimérica, 10 mm, e o sensor está revestido plasticamente.

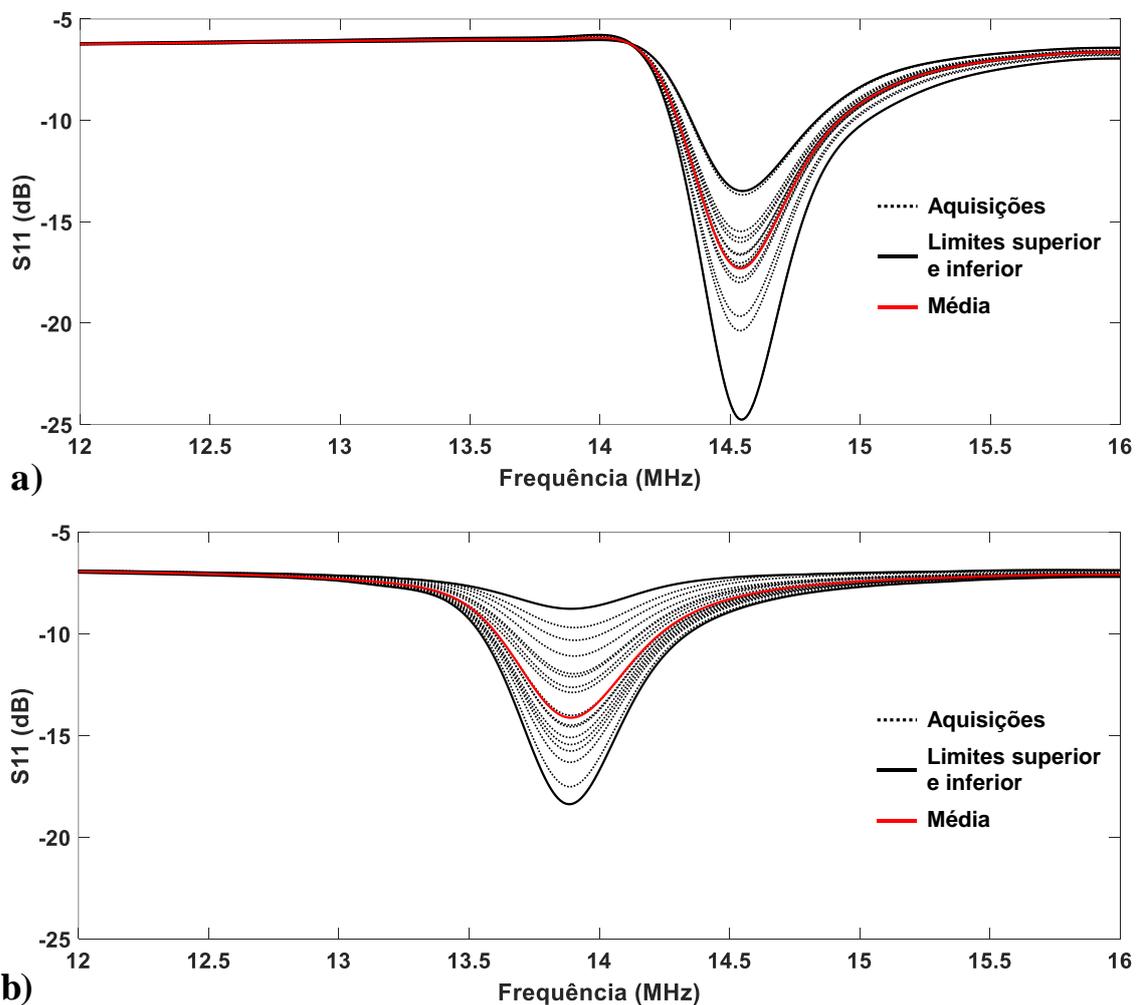


Figura 42 – Resultado experimental sensor ID 2049021188. a) Condição anular seco. b) Condição anular alagado.

Fonte: Elaborado pelo autor.

De forma análoga ao modelo numérico, a amplitude do parâmetro  $S_{11}$  sofreu redução ao ocorrer a mudança de condição de anular seco para alagado. A frequência de ressonância deslocou seus valores para frequências menores, respeitando a equação 9. Para este sensor a média da variação da frequência de ressonância foi de 0,61 MHz.

A figura 43 apresenta o comportamento do sensor ID 2049019396 em condição de anular seco e alagado. As amplitudes obtidas para o parâmetro  $S_{11}$ , para ambas as condições, são semelhantes às amplitudes obtidas nos resultados para o sensor ID 2049021188. Este resultado já era esperado, uma vez que a distância entre o sensor e o leitor para ambos os sensores era igual a uma camada polimérica. O sensor ID 2049019396 não possui revestimento de plastificação, logo, haverá maior proximidade entre o meio e o sensor e, por consequência, obteve-se um maior valor de variação de frequência de ressonância, em média de 1,23MHz. Resultado de deslocamento de frequência de ressonância muito semelhante ao resultado obtido no modelo numérico que foi de 1,1 MHz.

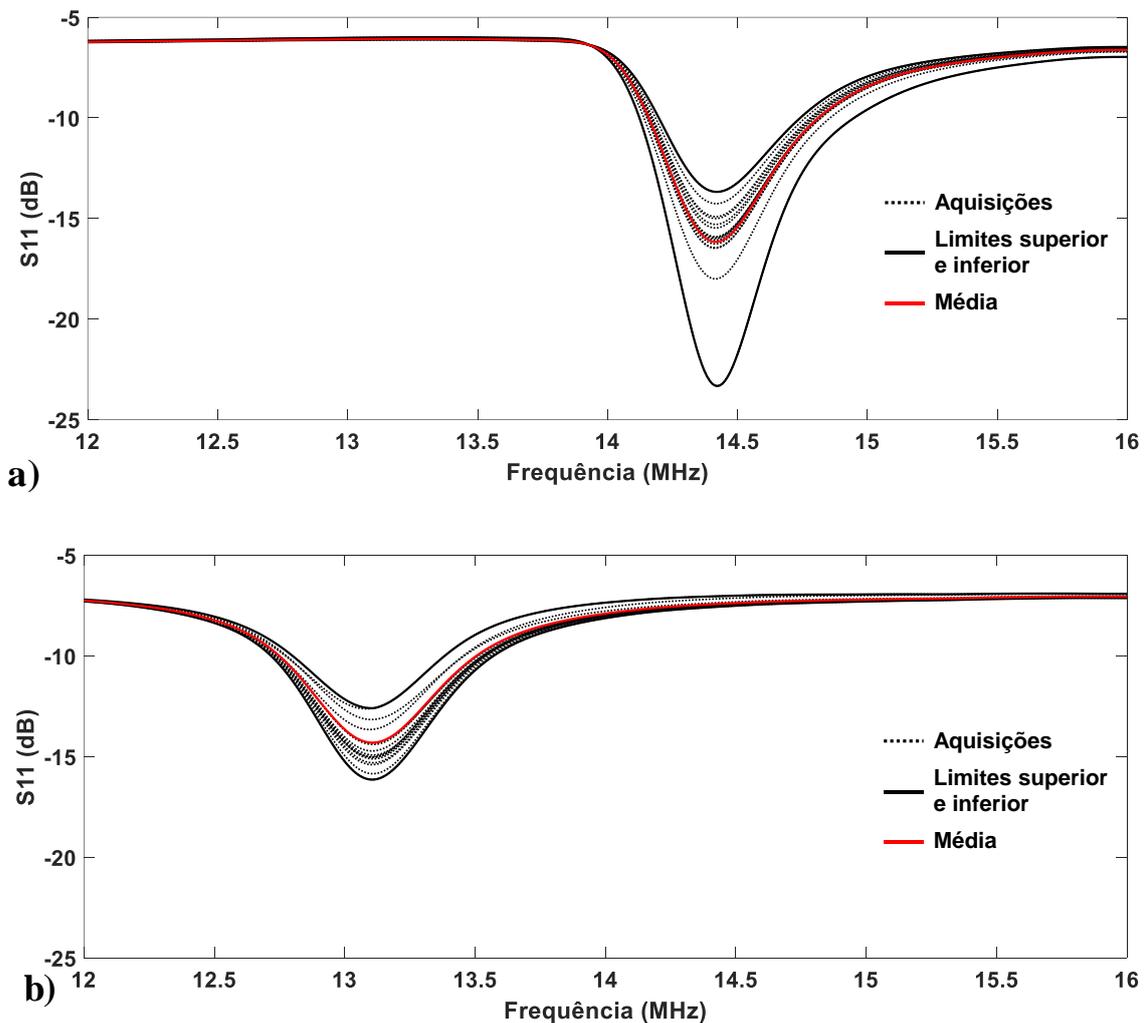


Figura 43 – Resultado experimental sensor ID 2049019396. a) Condição anular seco. b) Condição anular alagado.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Até o momento foram analisados sensores aplicados a distâncias de uma camada polimérica, 10 mm. A figuras 44 e 45 apresentam as curvas dos parâmetros  $S_{11}$  para as condições de anular seco e alagado para sensores espaçados de leitores a uma distância de duas camadas poliméricas, 20 mm. A figura 44 apresenta o resultado para o sensor ID 2049021444 e nota-se grande redução da amplitude no parâmetro  $S_{11}$  quando comparado aos sensores posicionados a uma distância de 10 mm do leitor. Este sensor não possui plastificação e a média

da variação de frequência de ressonância foi de 1,02 MHz entre as condições de anular seco e alagado.

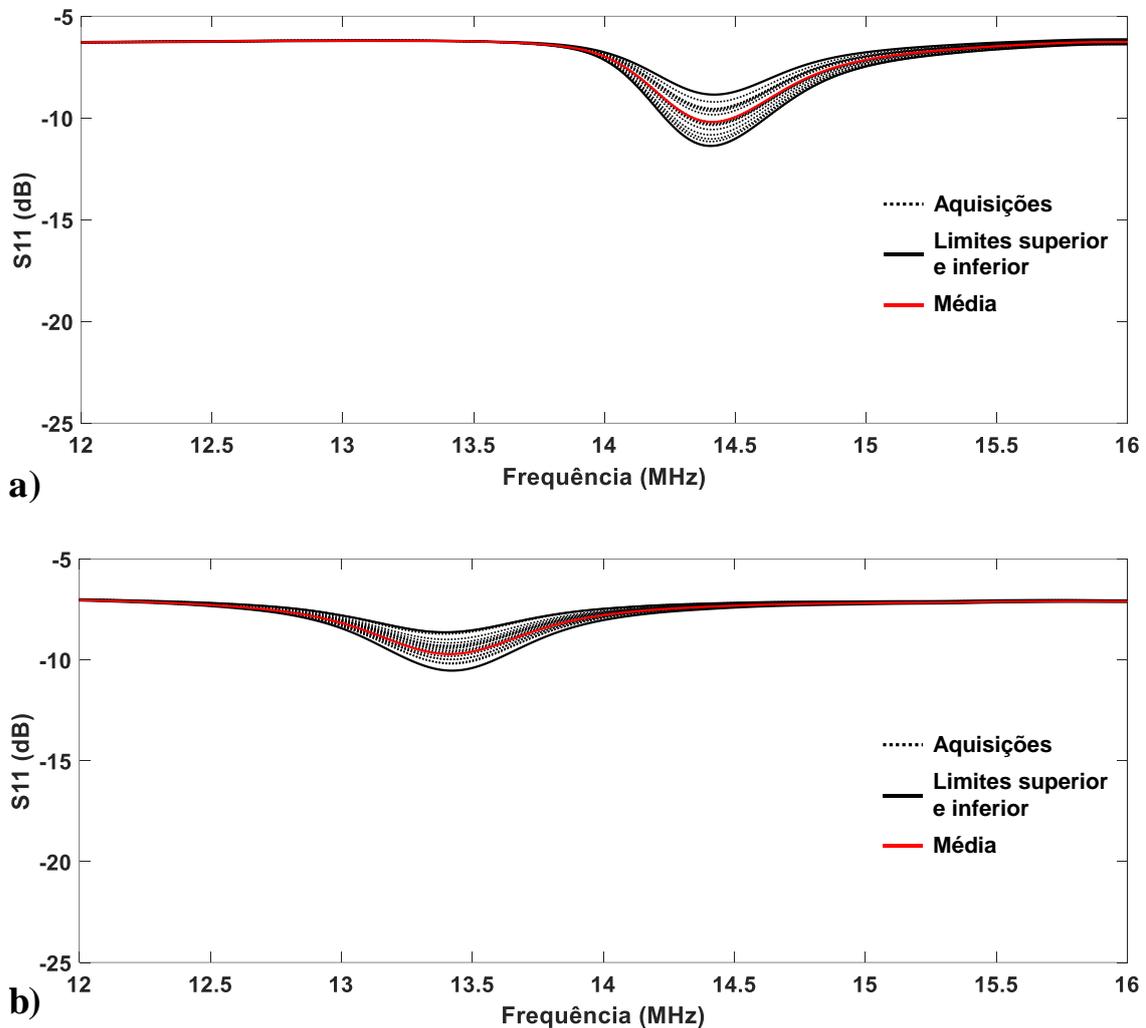


Figura 44 – Resultado experimental sensor ID 2049021444. a) Condição anular seco. b) Condição anular alagado.

Fonte: Elaborado pelo autor.

A redução da amplitude do parâmetro  $S_{11}$  pode ser verificada também para o sensor ID 2049020932 para as condições de anular seco e alagado, figura 45. Semelhante ao sensor ID 2049021188 o valor médio da variação da frequência de ressonância foi de 0,71 MHz e esta semelhança se justifica porque ambos os sensores estão revestidos pela mesma plastificação e estariam expostos a água de maneira muito similar.

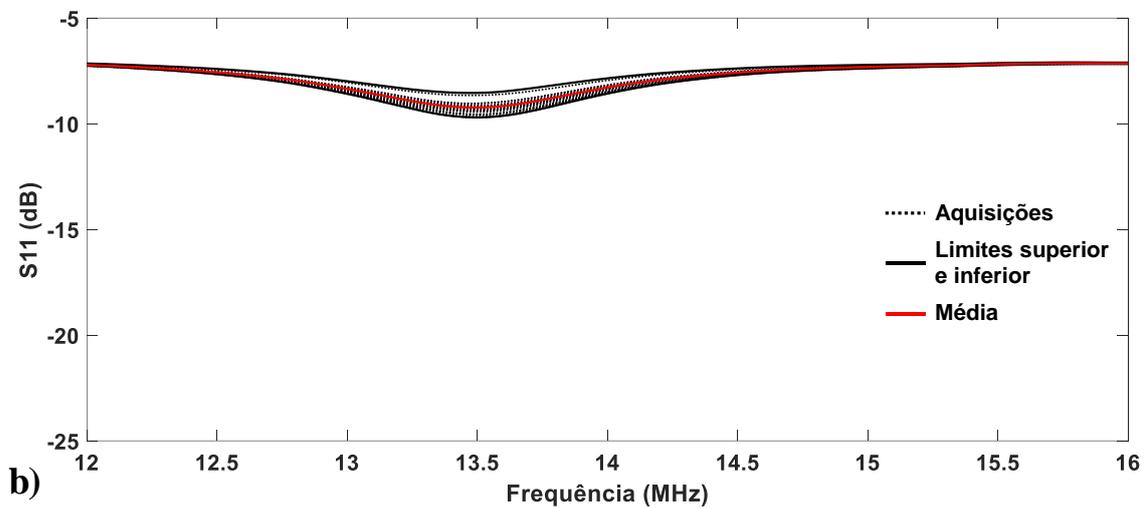
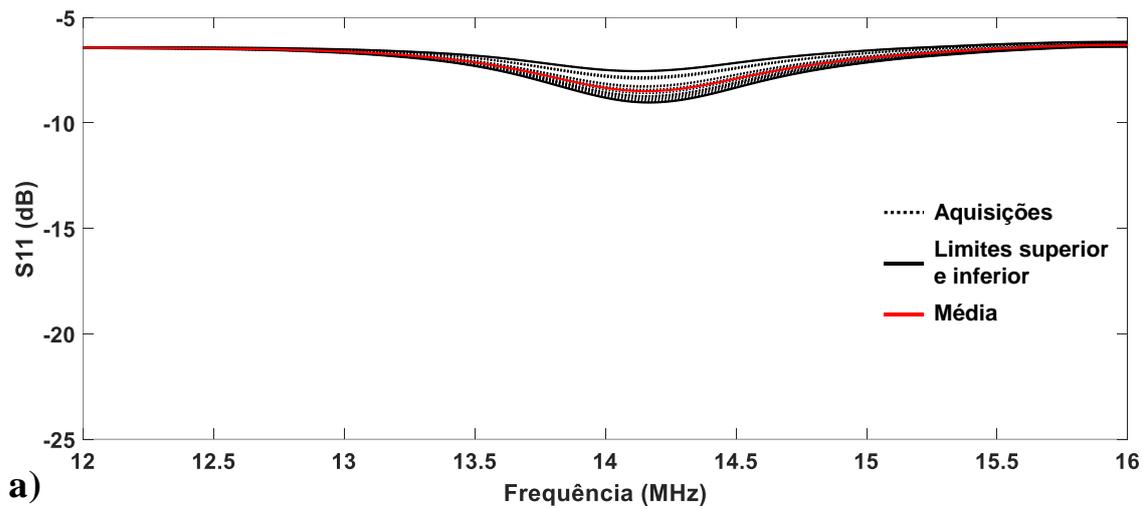


Figura 45 – Resultado experimental sensor ID 2049020932 a) Condição anular seco. b) Condição anular alagado.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 8 – Média, desvio padrão e variação de frequência de ressonância para cada sensor.

Identificação	Ensaio	Frequência de Ressonância Seco (MHz)	Frequência de Ressonância Alagado (MHz)	Varição de Frequência de Ressonância entre Seco e alagado (MHz)
2049020676	1	14,11±0,1227	13,29±0,1196	0,81
	2	13,97±0,0393	13,26±0,0712	0,71
	3	13,95±0,0085	13,31±0,1459	0,63
2049021188	1	14,51±0,0064	13,87±0,0134	0,64
	2	14,44±0,0056	13,81±0,1270	0,63
	3	14,45±0,0044	13,88±0,0140	0,57
2049020932	1	14,15±0,0387	13,48±0,1473	0,67
	2	14,12±0,0287	13,45±0,1435	0,67
	3	14,13±0,0310	13,34±0,1889	0,79
2049020420	1	14,46±0,0113	13,92±0,0711	0,54
	2	14,38±0,0060	13,86±0,0069	0,52
	3	14,42±0,0043	13,92±0,0029	0,50

2049021444	1	14,39±0,0135	13,40±0,0496	0,98
	2	14,24±0,0234	13,24±0,0429	1,00
	3	14,34±0,0281	13,26±0,0996	1,09
2049022468	1	14,57±0,0094	13,58±0,0243	0,99
	2	14,50±0,0091	13,47±0,0212	1,02
	3	14,51±0,0085	13,56±0,0101	0,95
2049022212	1	14,39±0,0102	13,15±0,0234	1,23
	2	14,27±0,0136	13,10±0,0759	1,17
	3	14,30±0,0135	13,14±0,0390	1,16
2049019396	1	14,39±0,0062	13,14±0,0354	1,25
	2	14,23±0,0125	13,03±0,1348	1,20
	3	14,32±0,0099	13,08±0,1042	1,24

Sensores Plastificados – 2049020676; 2049021188; 2049020932; 2049020420. Sem Plastificação – 2049021444; 2049022468; 2049022212; 2049019396.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Conforme obtido nos resultados numéricos e experimentais, o uso de revestimentos poliméricos pode reduzir a influência do meio sobre a frequência de ressonância do sensor. Assim, um valor de variação de frequência de ressonância deve ser definido para o desenvolvimento correto do dispositivo. Conforme mostrado na tabela 8, a variação de frequência de ressonância de sensores com revestimento é menor quando comparado aos sensores sem revestimento com um valor médio da diferença de 58 %. Logo o uso do revestimento exerce papel significativo sobre a sensibilidade do sensor, este resultado condiz também com o comportamento encontrado na figura 34, modelo numérico, na qual o aumento o revestimento leva a redução de frequência.

Como referido no capítulo anterior, uma análise no domínio do tempo foi realizada. A Figura 46 apresenta os valores do parâmetro  $S_{11}$  para o sensor ID 2049022468 em função do tempo. Para cada ensaio de alagamento, foram obtidas reduções significativas nos valores da frequência de ressonância, além da redução do módulo da intensidade do Parâmetro  $S_{11}$  na condição de anular alagado. Ambos os ensaios apresentaram pontos de interferência; na figura 46-a) este ponto ocorreu em torno de 1000 segundos, e nas Figuras 46-b) e 46-c), em torno de 600 segundos e 450 segundos, respectivamente. Esta interferência é obtida no momento que ocorre o contato da água externa com a bobina leitora do dispositivo. Um fato a ser destacado é o aumento da intensidade do parâmetro  $S_{11}$  logo após o contato da água externa e pode ser explicado uma vez que o modelo numérico sempre considerou que a geometria do leitor estaria imersa em meio com água. A presença da água ao redor da estrutura do leitor gerou alterações nos parâmetros de impedância do dispositivo, os quais se aproximaram do modelo numérico, levando a um melhor casamento de impedância e a um aumento do valor do módulo do parâmetro  $S_{11}$ .

Nitidamente é possível verificar na figura 46 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 instante onde inicia o alagamento ao redor do sensor. Nota-se alta sensibilidade para detecção de ingresso de água, já que também o ingresso de água pode se dar de forma mais lenta, na qual a água permeia do bore para o anular, assim quando o sensor está parcialmente imerso em água já ocorre alterações de frequência de ressonância.

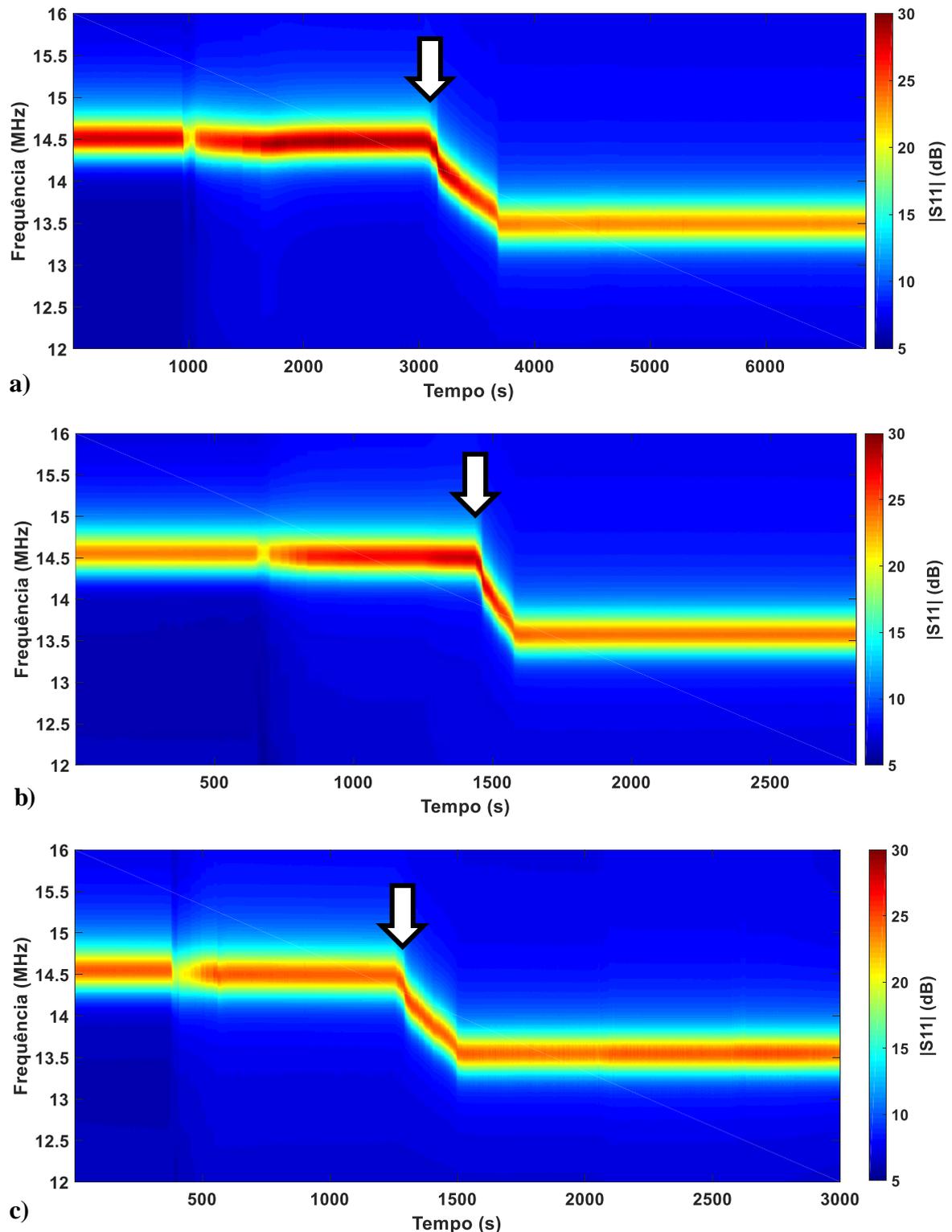


Figura 46 – Ensaio 1, sensor ID 2049022468, análise de frequência em função do tempo.  
Fonte: Elaborado pelo autor.

Outra forma de verificar estes dados é coletando o valor da frequência de ressonância em função do tempo. A figura 47 apresenta o comportamento dos valores de frequência de ressonância em função do tempo. Na figura, estão circulado em vermelho os intervalos de tempo onde houve interferência no sinal devido ao contato da água com o leitor. É possível

verificar que mesmo com esta interferência, houve pequena variação dos valores de frequência de ressonância e esta variação é muito inferior quando comparada à variação dos valores de frequência de ressonância do anular na condição alagado. As setas brancas indicam o instante onde inicia o alagamento ao redor do sensor.

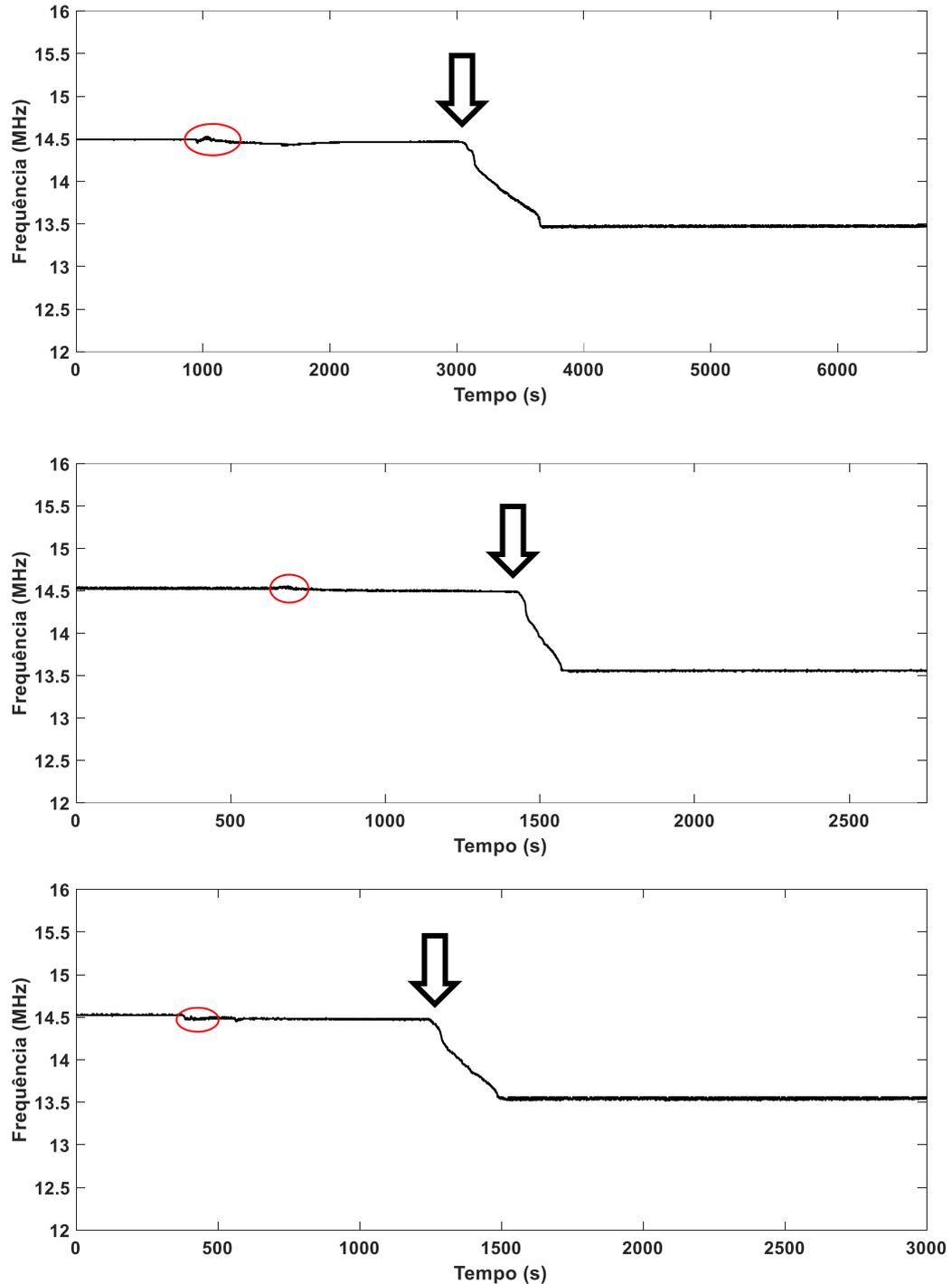


Figura 47 – Comportamento da frequência de ressonância em função do tempo para o sensor ID 2049022468. Os círculos em vermelho indicam o momento do contato entre água externa ao duto e o leitor. As setas em branco apontam o instante do início do alagamento.

Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir dos dados experimentais obtidos podemos concluir que a presença ou não do revestimento influencia na sensibilidade do sensor.

A sensibilidade dos sensores depende de diversos parâmetros, tais como frequência de operação, tipo e espessura do revestimento aplicado e tamanhos dos sensores, o que dificulta as comparações entre os trabalhos publicados.

A tabela 9 apresenta um comparativo de trabalhos publicados para sensores LC e/ou com RFID, com o uso de revestimentos semelhantes. Para Harpster *et al* (2002), utilizar frequência de operação menor, acarreta em uma menor sensibilidade, ou seja, menores variações de frequência entre as condições seco e alagado. Já para frequências de operação maiores ocorre a elevação da sensibilidade, Xie (2019) e Feng *et al* (2014).

A aplicabilidade do componente de identificação por radiofrequência é o condicionante da frequência de operação escolhida neste trabalho, já que em valores de frequência muito diferentes de 13.56 MHz irá ocorrer a incapacitação do funcionamento do componente integrado de identificação. Salmerón *et al* (2015), é o trabalho que mais se aproxima em termos de frequência de operação e a sensibilidade de seu sensor também é próxima à encontrada neste trabalho.

Tabela 9 - Comparativo entre resultados obtidos por outros trabalhos semelhantes.

Autor	Frequência de Ressonância Seco (MHz)	Sensibilidade $\Delta f$ (MHz)
Ong e Grimes (2000)	23,00	0,80
Harpster <i>et al</i> (2002)	3,50	0,60
Dong <i>et al</i> (2014)	47,00	4,00
Zarifi, Deif e Daneshmand (2017)	100,00	10,00
Radovanovic et al (2018)	27,00	5,00
Xie (2019)	182,00	14,00
Feng <i>et al</i> (2014)	157,00	37,00
Tan <i>et al</i> (2007)	24,00	1,30
Chang; Kim, Yoon (2007)	5300,00	10,00
Salmerón et al (2015)	9,50	0,40
Kuhn, Jacques e Clarke (2019)	13,50	3,00
Este Trabalho	14,39	1,25

Fonte: Elaborado pelo autor.

#### 4.4 Ensaios de Temperatura

O efeito da variação da temperatura na frequência de ressonância do sensor também foi verificado.

O resultado obtido para um dos três ensaios aplicados no sensor sem revestimento pode ser visualizado na figura 48. Nela, é possível verificar a existência de patamares, e cada um destes corresponde a uma temperatura à qual o sensor foi submetido. Cada ponto na figura 48 representa uma aquisição do valor da frequência de ressonância. Após tratamento dos dados

extraídos da figura 48, foi possível gerar a figura 49, onde são apresentados os valores médios da frequência de ressonância em função da temperatura para os três ensaios propostos para o sensor sem revestimento. Nos três ensaios é possível observar a redução da frequência de ressonância com o aumento da temperatura. No intervalo de temperatura de 5 °C até 55 °C observou-se que o maior valor de variação de frequência de ressonância foi de 0,27 MHz para o ensaio 1.

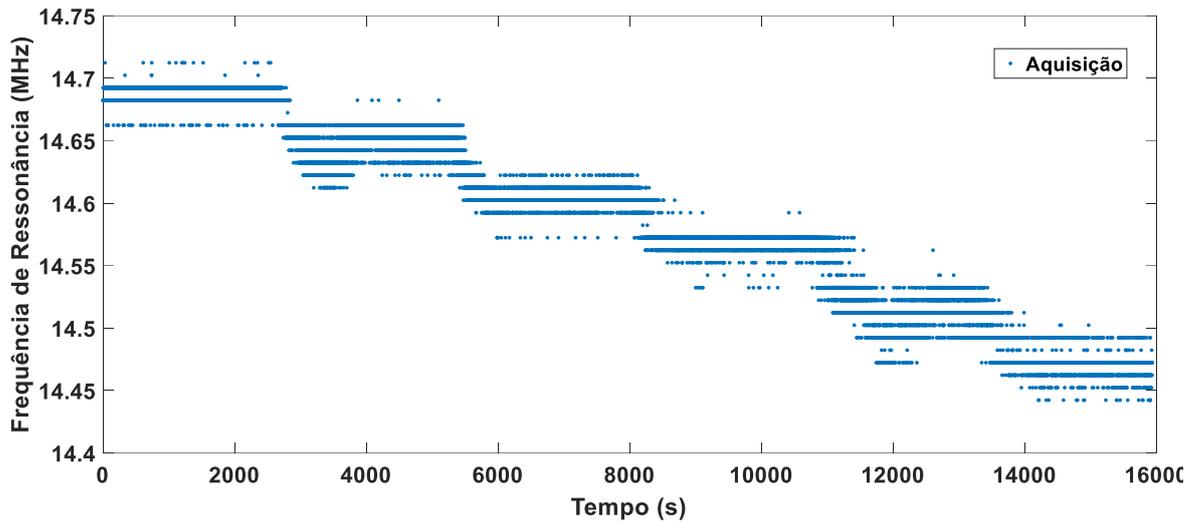


Figura 48 – Frequência de ressonância em função do tempo para diferentes temperaturas e com sensor sem revestimento.

Fonte: Elaborado pelo autor.

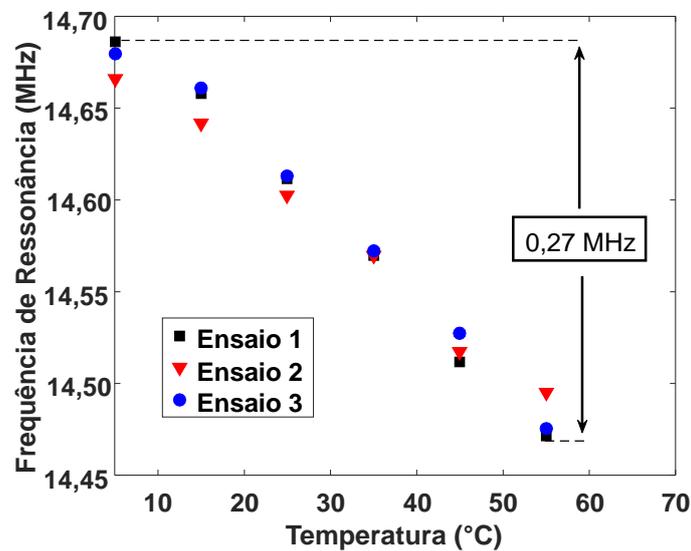


Figura 49 – Correlação da frequência de ressonância do sensor e a temperatura para o sensor sem revestimento.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Similar aos resultados anteriores, as figuras 50 e 51 apresentam as aquisições obtidas em função do tempo e o comportamento da frequência de ressonância em função da temperatura, respectivamente, para o sensor com revestimento. Nota-se, também, a geração de patamares em cada temperatura de análise e com o aumento da temperatura um aumento da

dispersão dos valores de frequência de ressonância. A figura 51 apresenta os resultados para os 3 ensaios realizados com o sensor com revestimento. Para todas as aquisições, houve uma redução da frequência de ressonância com o aumento da temperatura. Para este sensor, houve uma variação de frequência de ressonância máxima de 0,22 MHz, um valor bem próximo ao valor obtido para o caso do sensor sem revestimento.

Os resultados experimentais acima citados entram em acordo com os resultados de Ong (2001), uma redução da frequência de ressonância com aumento da temperatura com a taxa de variação igual a 6.4 kHz/°C, já nesta tese foi encontrada uma taxa de variação de 5.4 kHz/°C.

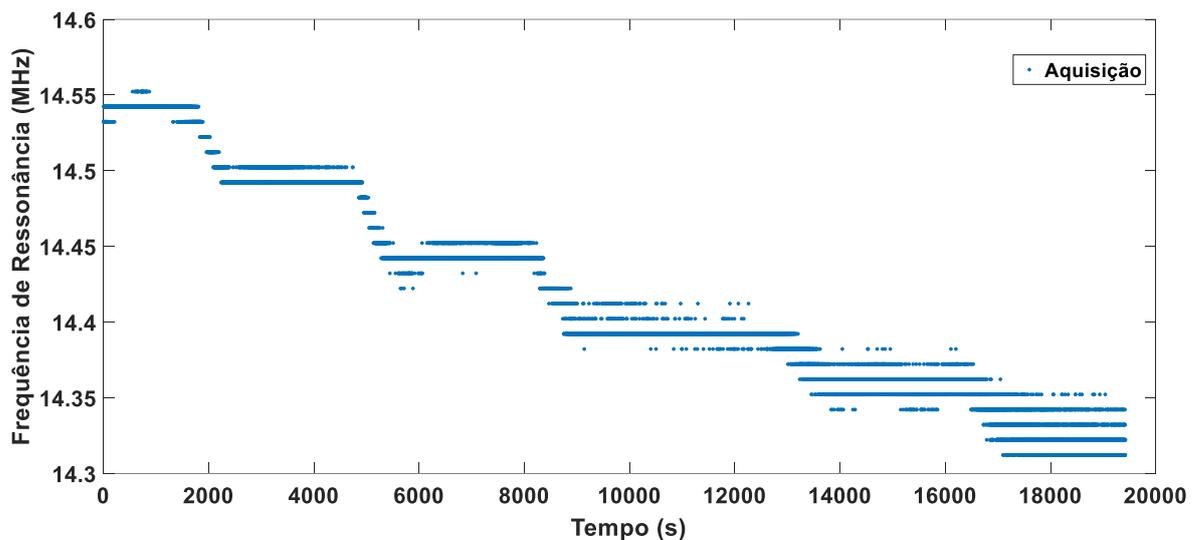


Figura 50 – Frequência de ressonância em função do tempo para diferentes temperaturas e com o sensor com revestimento.

Fonte: Elaborado pelo autor.

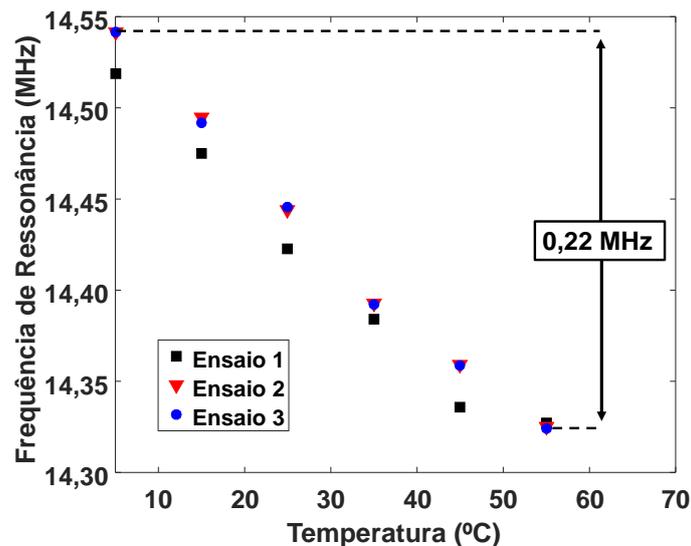


Figura 51 – Correlação da frequência de ressonância do sensor e a temperatura para o sensor com revestimento.

Fonte: Elaborado pelo autor.

#### 4.5 Ensaio em Escala Média Após Um Ano da Inserção dos Sensores

Após 1 ano, os ensaios experimentais são retomados, e novamente as simulações de alagamento do anular foram realizadas para coletar dos sinais e dados dos sensores e estes podem ser visualizados na tabela 10. Três sensores não apresentaram funcionamento e seus dados não foram coletados. Para os demais, em todos os casos, houve redução da frequência de ressonância com o alagamento da região do anular, semelhante ao ocorrido anteriormente nos ensaios de 2020.

Tabela 10 - Dados experimentos 2021.

<b>Identificação</b>	<b>Ensaio</b>	<b>Frequência de Ressonância Seco (MHz)</b>	<b>Frequência de Ressonância Alagado (MHz)</b>	<b>Variação de Frequência de Ressonância entre Seco e alagado (MHz)</b>
2049020676	1	13,93±0,0042	13,33±0,0046	0,60
	2	13,85±0,0141	13,39±0,0050	0,46
	3	13,93±0,0036	13,46±0,0048	0,47
2049021188	1	-	-	-
	2	-	-	-
	3	-	-	-
2049020932	1	13,99±0,0053	13,55±0,0018	0,44
	2	14,01±0,0051	13,41±0,0660	0,60
	3	14,08±0,0019	13,55±0,0034	0,53
2049020420	1	14,43±0,0009	14,08±0,0018	0,35
	2	14,45±0,0037	14,01±0,0095	0,44
	3	14,42±0,0020	14,06±0,0005	0,36
2049021444	1	-	-	-
	2	-	-	-
	3	-	-	-
2049022468	1	14,50±0,0013	13,76±0,0017	0,74
	2	14,38±0,0017	13,74±0,0020	0,64
	3	14,42±0,0019	13,81±0,056	0,61
2049022212	1	-	-	-
	2	-	-	-
	3	-	-	-
2049019396	1	14,37±0,0011	13,55±0,0010	0,82
	2	14,27±0,0031	13,33±0,0133	0,94
	3	14,32±0,0039	13,44±0,0107	0,88

Sensores Plastificados – 2049020676; 2049021188; 2049020932; 2049020420. Sem Plastificação – 2049021444; 2049022468; 2049022212; 2049019396.

Fonte: Elaborado pelo autor.

A comparação dos dados obtidos nos ensaios de 2021 com os dados dos obtidos nos ensaios de 2020 pode ser visualizada na figura 52 e demonstra uma redução da sensibilidade do sensor, ou seja, uma menor variação de frequência de ressonância quando o sensor se encontra na condição de anular alagado. Esta redução de sensibilidade pode ser relacionada à absorção da unidade por parte do substrato de FR4, ou dos polímeros aplicados como revestimentos.

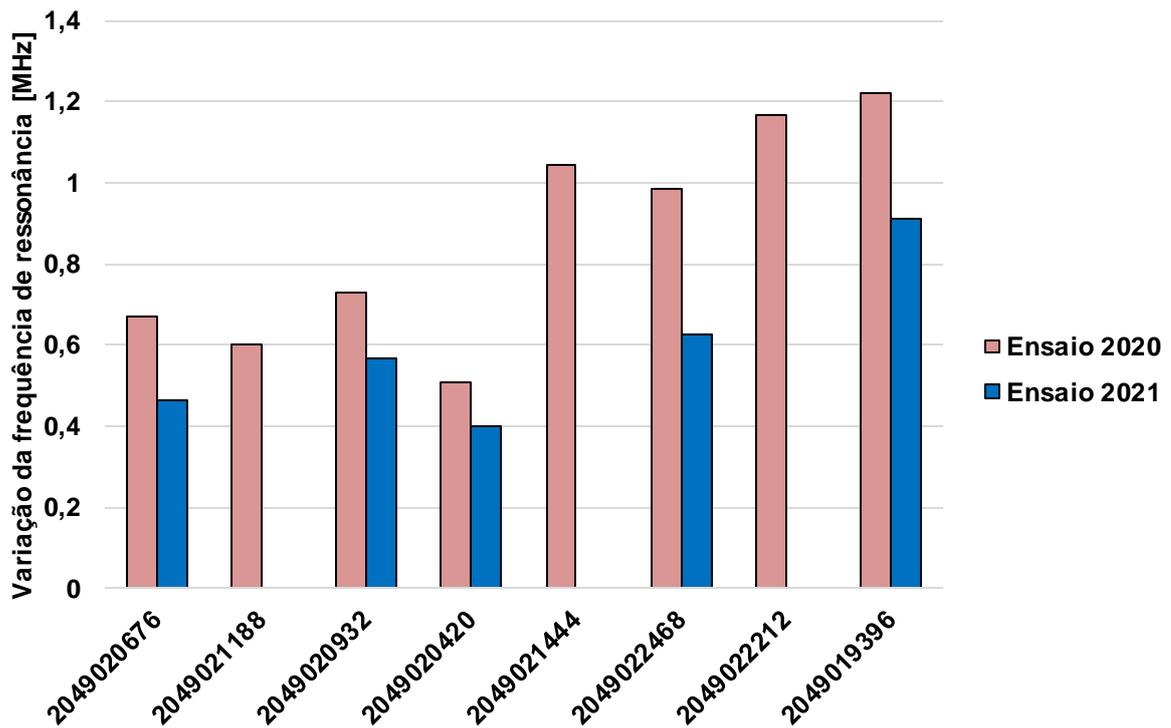


Figura 52 - Comparação entre resultados de 2020 e 2021.  
Fonte: Elaborado pelo autor.

Além disso, a figura 53 apresenta uma análise da intensidade de sinal, parâmetro S11, correlacionada com a frequência e o tempo para os sensores 2049022468, figura 53 – a), 2049020420, figura 53 – b), e 2049020932, figura 53 – c). Para ambos os sensores as condições seco e alagado podem ser diferenciadas. Na figura 53 – c), a escala impossibilitou uma melhor diferenciação, porém ainda assim é possível verificar esta redução de frequência. Nelas as setas em branco representam o instante de início do alagamento.

Outra forma de visualizar é coletando o valor da frequência de ressonância para cada instante de aquisição. A figura 54 apresenta este resultado para os mesmos sensores da figura 53 e na mesma ordem. Da mesma forma, é possível notar a redução da frequência de ressonância quando ocorre alteração da condição de seco para alagado. As setas em branco representam o instante de início do alagamento.

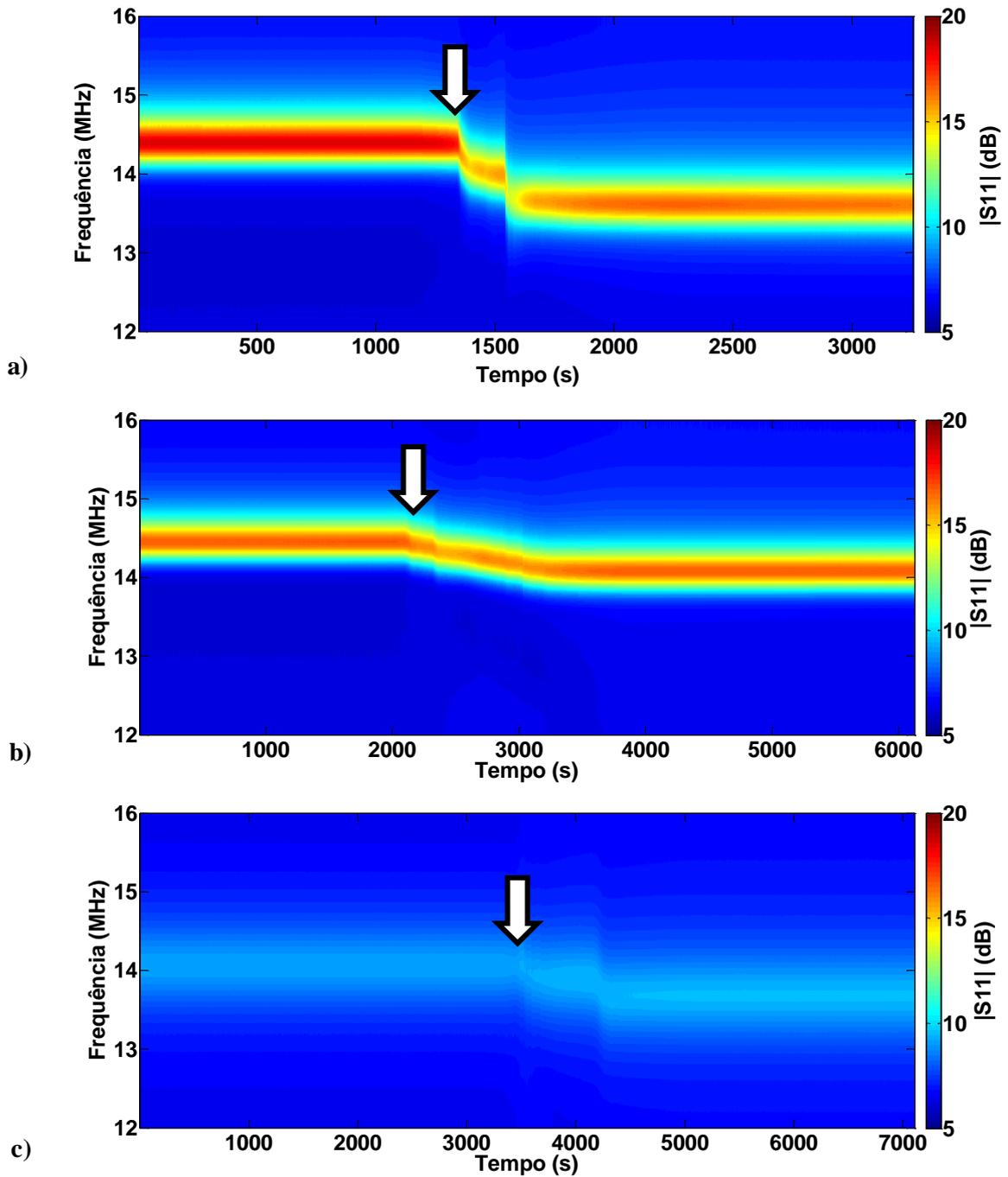


Figura 53 – Correlação do parâmetro S11 com a frequência e o tempo. Figura 53 – a) Sensor 2049022468; Figura 53 – b) Sensor 2049020420; Figura 53 – c) Sensor 2049020932.

Fonte: Elaborado pelo autor.

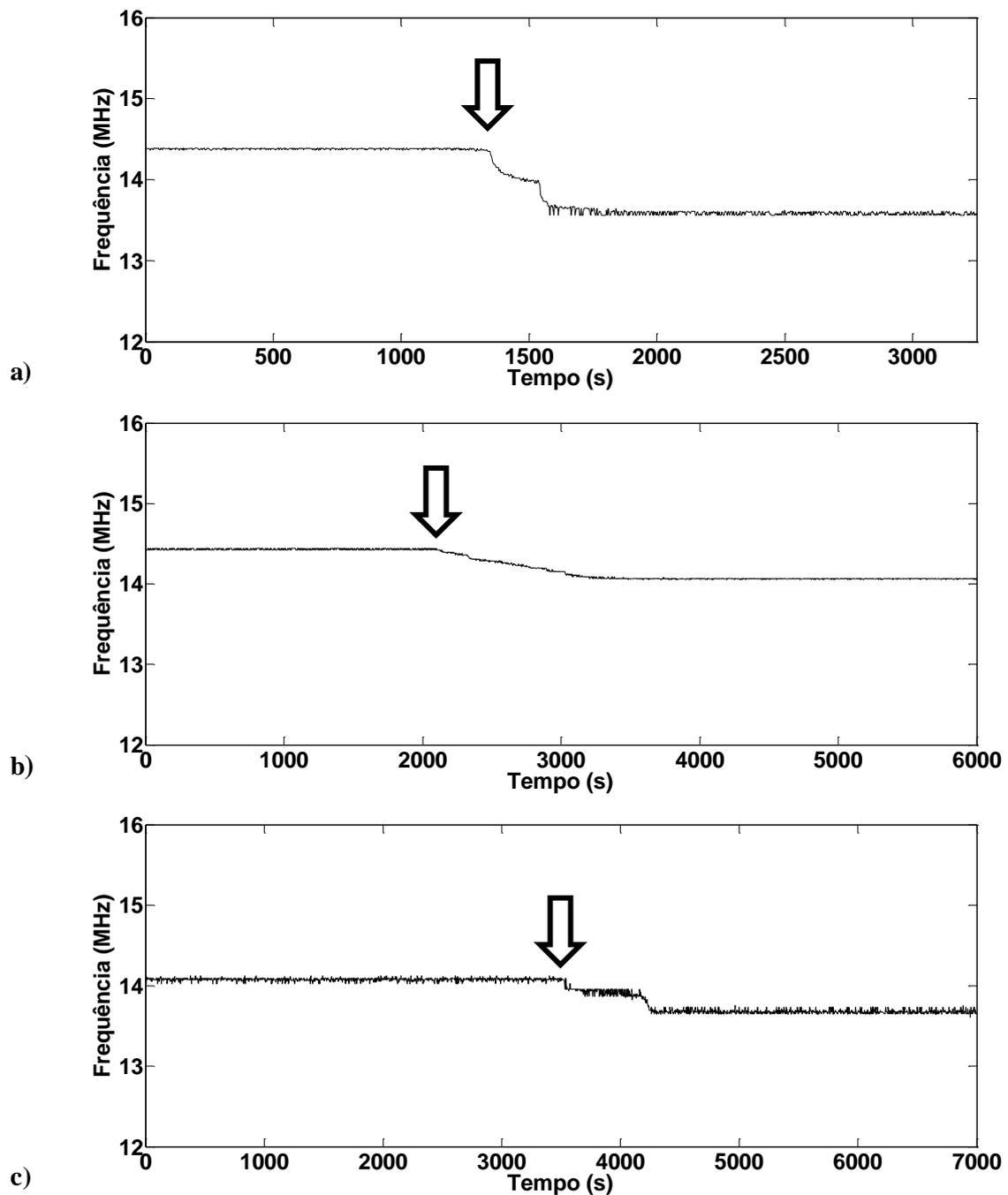


Figura 54 – Resposta baseada na frequência de ressonância em função do tempo.  
 Fonte: Elaborado pelo autor.

#### 4.6 O Efeito da Inclinação da Bobina Leitora em Relação ao Sensor.

Os dados obtidos para a análise do efeito da inclinação entre a bobina leitora e a bobina do sensor podem ser visualizados na tabela 11. Para as 3 inclinações propostas os valores médios e individuais obtidos têm uma singela variação, comprovando que a inclinação do sensor tem influência sobre a frequência de ressonância. No entanto, o valor é muito baixo quando comparado à redução de frequência de ressonância gerada pela presença de água. A figura 55 apresenta o efeito desta inclinação sobre o parâmetro S11, na qual pode ser verificada

uma redução da intensidade do parâmetro S11 com o aumento da inclinação. Analisando as linhas de fluxo magnético, a geometria com maior inclinação tende a reduzir a concentração destas linhas através da espira sensora. Observando o afastamento geométrico ao se inserir a inclinação, a distância entre as bobinas também é alterada e, como vimos anteriormente, o aumento da distância leva à redução do coeficiente de acoplamento e da intensidade de campo magnético e ambos contribuem para a redução da intensidade do parâmetro S11.

Tabela 11 – Dados para inclinações da bobina leitora.

Identificação	Ensaio	Frequência de Ressonância Inclinação 10° (MHz)	Frequência de Ressonância Inclinação 20° (MHz)	Frequência de Ressonância Inclinação 30° (MHz)	Frequência de Ressonância Inclinação 0° (MHz)
2049019396	1	14,23±0,0462	14,21±0,0331	14,25±0,0062	14,29±0,0124
	2	14,27±0,0215	14,32±0,0433	14,28±0,0184	14,33±0,0181
	3	14,32±0,0395	14,39±0,0126	14,39±0,0051	14,36±0,0094
Média		14,27±0,0357	14,31±0,0297	14,30±0,0099	14,32±0,0133

Fonte: Elaborado pelo autor.

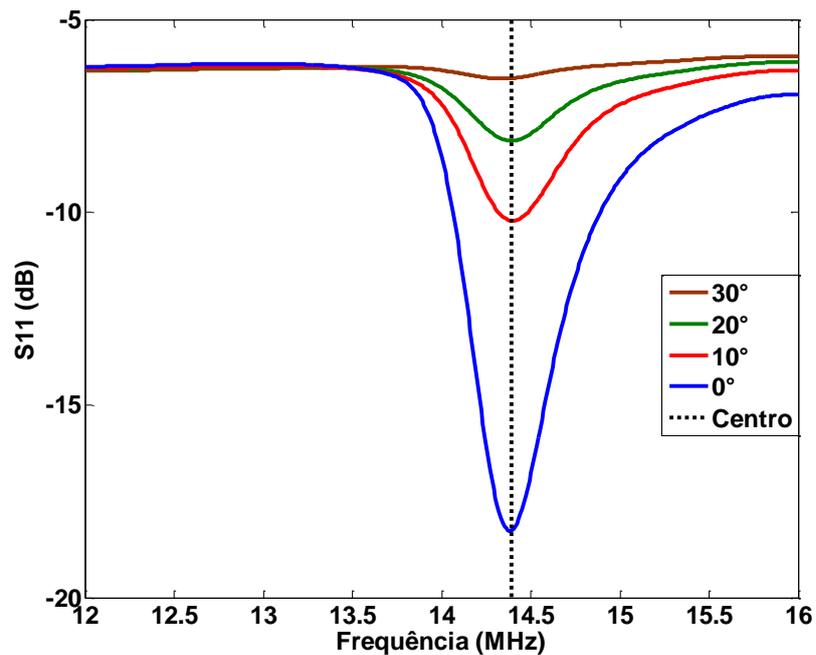


Figura 55 – Influência da inclinação da bobina leitora no parâmetro S11.

Fonte: Elaborado pelo autor.

#### 4.7 O Efeito da Excentricidade da Bobina Leitora em Relação ao Sensor.

Uma vez que já confirmamos que a inclinação entre as bobinas leva a singelas alterações de frequência de ressonância, pode ser verificado que a excentricidade também é responsável por alterações de frequência de ressonância. Para todas as posições propostas houve alteração em relação à frequência de ressonância, estes valores podem ser visualizados na tabela 12. Os motivos dessas alterações está na variação da densidade de fluxo magnético, levando a uma

alteração da indutância mútua e, conseqüentemente, da indutância equivalente do sensor. Também foi observada redução do parâmetro S11 para as posições excêntricas.

Tabela 12 – Excentricidade entre bobinas Sensor 2049019396 .

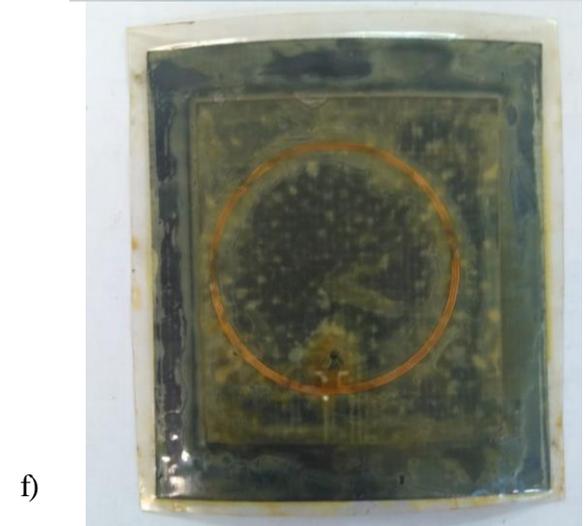
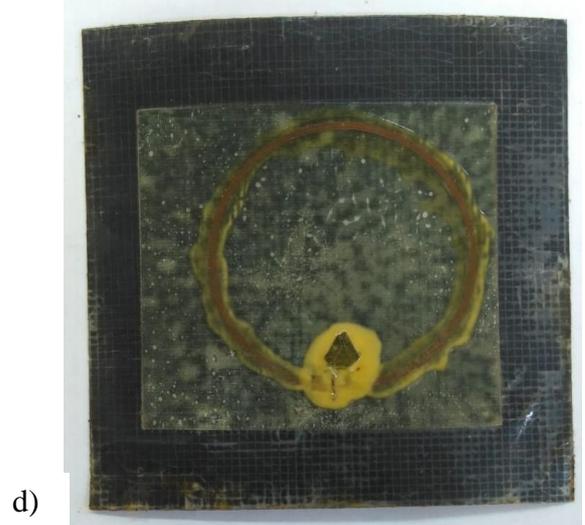
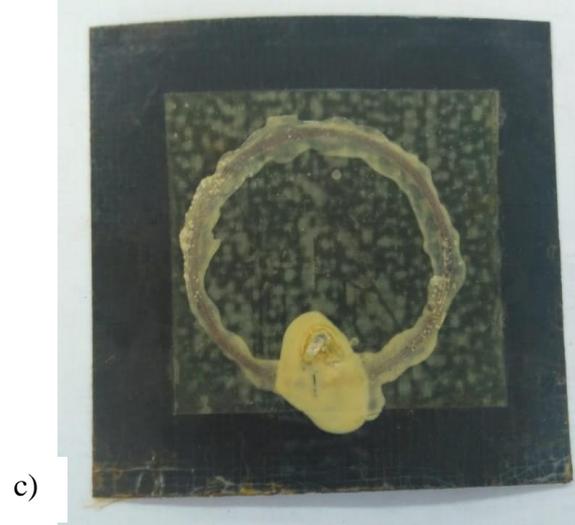
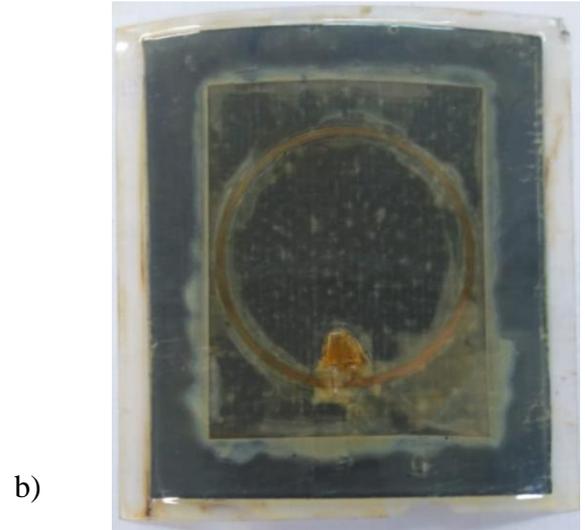
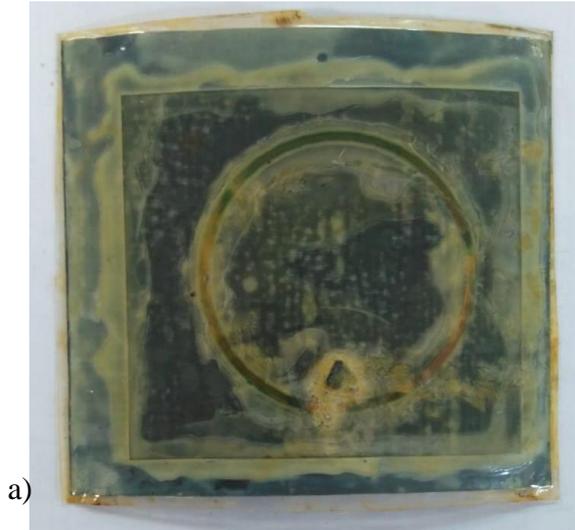
Ensaio	Frequência de Ressonância NE (MHz)	Frequência de Ressonância SE (MHz)	Frequência de Ressonância SO (MHz)	Frequência de Ressonância NO (MHz)	Frequência de Ressonância Centrado (MHz)
1	14,13±0,0364	14,14±0,0531	14,17±0,0074	14,17±0,0052	14,29±0,0124
2	14,28±0,0087	14,33±0,0379	14,26±0,0100	14,27±0,0089	14,33±0,0181
3	14,33±0,0176	14,29±0,0424	14,32±0,0061	14,33±0,0102	14,36±0,0094
Média	14,25±0,0209	14,25±0,0444	14,25±0,0078	14,25±0,0081	14,32±0,0133

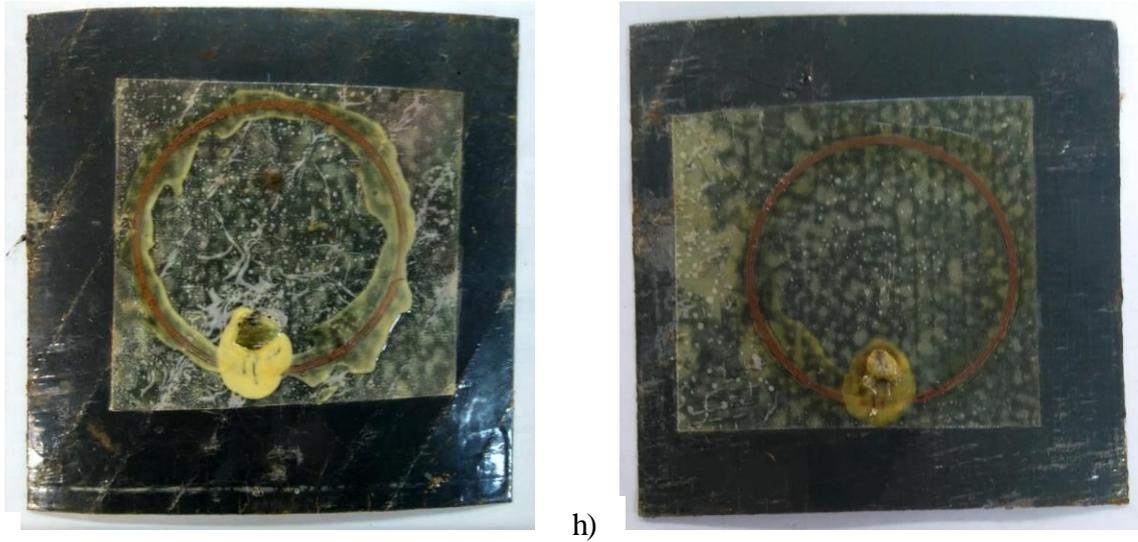
Fonte: Elaborado pelo autor.

#### 4.8 Análise de Falha.

Conforme anteriormente relatado, três sensores não responderam ao interrogador de RFID convencional e nem à leitura da bobina leitora. Logo, não foi possível obter a curva S11 x frequência e conseqüentemente indicar o alagamento ou não do anular. Assim, iniciou-se um procedimento de análise de falha desses sensores com a finalidade de entender o motivo pelo qual eles não funcionaram.

Inicialmente, todos os oito sensores foram removidos e fotografados conforme a figura 56, nas letras de a) até g). Houve falha do revestimento de polietileno para os sensores ID – 2049020676, 2049021188, 2049020932, 2049020420. Pode-se notar que houve ingresso de água no interior deste revestimento pela coloração amarelada. Outro ponto interessante a destacar é a interação do poliuretano, resina isolante, com o meio. Este material é transparente em meio ao ar e, quando em contato com a água, notou-se interação devido à alteração de cor e de resistência mecânica do material. Nas imagens c) e g) são bem nítidas essas alterações, levando à conclusão que ele permite a permeação de moléculas de água. Do ponto de vista físico da integridade dos sensores, todos estavam inteiros, alguns até com as marcas dos arames, imagem g). Os aspectos amarelados de todos os sensores são devido ao produto de corrosão, óxido de ferro, que fica dissolvido na água e posteriormente acumulado no sensor.





g) h)  
 figura 56 – Sensores após 1 ano inseridos. a) ID – 2049020676; b)ID – 2049021188; c) ID – 2049021444; d) ID – 2049022468; e)ID – 2049020932; f) ID – 2049020420; g) ID – 2049022212; h) ID – 2049019396.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Após a inspeção visual acima referida, novamente todos os sensores foram testados, verificando sua capacidades de comunicação e, assim como nos ensaios de alagamento do ano de 2021, os sensores ID 2049021188, ID 2049021444 e ID 2049022212 não funcionaram. Nestes sensores foram realizadas as seguintes etapas de análise de falha:

- Verificação visual de curto circuito ou abertura de circuito: Não foi verificada a existência deste problema.
- Verificação de circuito aberto ou curto circuito através de medição de resistência: Os valores de resistência para as trilhas obtidos são apresentados na tabela 13.

Tabela 13 - Dados análise de falha

Identificação	Resistência Trilha $\Omega$	Resistência CI $\Omega @13,56 \text{ MHz}$	Capacitância CI $\text{pF} @13.56 \text{ MHz}$
2049021188	1,0	227	107
2049021444	0,9	200	70
2049022212	1,0	199	71

Fonte: Elaborado pelo autor.

- Analisando a resistência da trilha também não houve modificações significativas.
- Verificação visual de rompimento de ligação elétrica no componente integrado de RFID: O sensor ID – 2049021188 estava com uma das conexões soltas. Isto é bem possível já que foram soldados manualmente e os CIs não possuem *leads*, que são prolongamentos para facilitar a soldagem.
- Após a verificação da integridade da bobina iniciou-se a análise nos componentes integrados de radiofrequência. A tabela 13 apresenta os dados obtidos da medição da capacitância e resistência na frequência de 13,56 MHz. Nota-se que os valores de capacitância medidos são bem superiores aos valores originais, em torno de 50 pF.

Dessa forma, como mostrado na equação 10 este valor de capacitância influi diretamente na frequência de ressonância do sensor. O aumento deste valor gera um descasamento de impedância e alteração da frequência de ressonância do sensor para valores muito menores, impossibilitando a leitura com o sistema convencional e a com a bobina leitora do dispositivo. Outro fato relevante é o aumento da resistência do CI, que antes estava entre 2 e 3 ohms, e agora dispara para valores em torno de 200 ohms. Com estas medidas pode-se afirmar que houve alguma interação do CI com o meio e/ou algum dano interno em seu funcionamento. O exato motivo da falha do componente integrado deve ser mais bem estudado, já que pode estar relacionado à aplicação em meio corrosivo e aquoso, como também a alguma falha interna por excesso de campo magnético aplicado. A figura 57 apresenta a imagem ampliada dos três CIs durante a análise da falha. Nota-se que as suas terminações para contato elétrico estão íntegras, algumas regiões mais brilhosas são em decorrência da solda depositada.

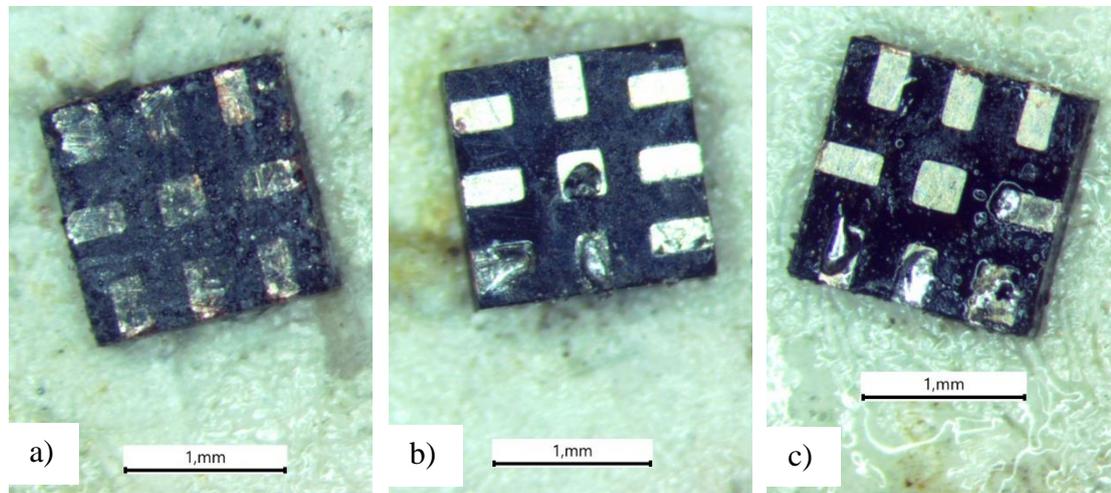


Figura 57 – Imagem ampliada do CIs. a) 2049021188; b)2049021444; c)2049022212.  
Fonte: Elaborado pelo autor.

Uma das possíveis forma de se contornar o problema de dano nos componentes integrados de identificação por radiofrequência é sua remoção e o uso de sistema *chipless* RFID na qual utilizam de outros mecanismos para identificação do sensor e não o uso de um componente integrado. Além disso o uso destes sistema pode contribuir ainda mais para redução de espessura do sensor.

## 5. CONCLUSÃO

A efetividade da detecção do alagamento com o uso de um dispositivo com sensores RFID foi comprovada. Significativas variações na frequência de ressonância dos sensores, de até 1,25 MHz, foram observadas para a condição de anular alagado. Os objetivos propostos neste trabalho foram alcançados, uma vez que foram desenvolvidos protótipos de sensores flexíveis com espessura reduzida e uma bobina leitora; e comprovou-se a possibilidade da identificação dos sensores por cima dos revestimentos poliméricos. Além dos dados de identificação dos sensores foi possível obter de forma precisa os seus valores de frequências de ressonância, bem como determinar a condição do anular do segmento de duto flexível.

O caráter inovador desta tese é refletido em duas publicações em revistas com boa relevância científica e em um pedido de depósito de patente com dois professores adjuntos da universidade. Nota-se também que, apesar de ser apresentado no item 2.4 mais de cinquenta referências sobre o sensoriamento com uso de circuito LC e RFID, nenhuma destas é correlacionada com o projeto de sensores RFID para detecção de alagamento em dutos flexíveis. Dessa forma, o trabalho mostrou-se inovador e agregou conhecimento para o estado da arte desta tecnologia, como também abriu mais uma linha de aplicação para a RFID.

A aplicação de mais uma ferramenta para gestão das estruturas de exploração de petróleo e gás traz consigo ganhos imensuráveis. A redução de riscos ambientais e sociais relacionados à operação, por si só, já justifica a implementação deste dispositivo. A informação da condição do anular para o gestor será fundamental para o processo de tomada de decisão.

Sobre a distância de leitura proposta, de acordo com os ensaios executados no segmento de duto flexível, o dispositivo mostrou-se capaz de detectar o alagamento em dutos flexíveis com revestimentos de até 20 mm. Também é de suma importância frisar que no projeto deste tipo de dispositivo deve ser executado, de forma conjunta, o projeto da bobina do sensor e do leitor, com a finalidade de garantir o melhor casamento de impedância do dispositivo. Além disso, deve-se considerar o meio de aplicação e a distância entre as bobinas. Essas diretrizes têm como intuito proporcionar a maximização do sinal e da qualidade da resposta do dispositivo, como também já explicado na revisão bibliográfica.

Em relação à influência de parâmetros testados, o efeito da temperatura na resposta do dispositivo foi avaliado e pode ser negligenciado, já que as variações de ressonância devido à presença da água são bem superiores às causadas pela variação da temperatura, que foi de 0,27 MHz para uma variação de 50° C. O efeito da excentricidade e da inclinação sobre a frequência de ressonância dos sensores existe, e é mínimo, 0,07 MHz e 0,05 MHz, respectivamente. Logo, esta alteração não possui significância na interpretação do resultado. No entanto, tem forte influência na intensidade do sinal e, dessa forma, sugere-se principalmente manter a mesma inclinação durante a aquisição do sinal.

A falha de três sensores pode ser reflexo da escolha inadequada dos revestimentos aplicados. Logo, uma nova pesquisa de caráter exploratória deverá ser realizada com a finalidade de buscar revestimentos mais resistentes à umidade e a meios aquosos. Alterações

significativas de impedância foram observadas nos 3 componentes integrados dos sensores que apresentaram defeito durante a condução dos ensaios em escala média de 2021. A perda da capacidade de aquisição do sinal está relacionada à falha destes componentes. O processo de soldagem destes componentes deve ser aprimorado, com a finalidade de aumentar a robustez do conjunto.

Após 1 ano, com os novos ensaios, a efetividade da detecção da presença de água com o uso do dispositivo proposto foi comprovada novamente. Reduções na variação da frequência de ressonância entre as condições foram verificadas, com máxima variação de 0,94 MHz e mínima variação de 0,36 MHz. Mesmo assim os sensores mostraram-se capazes de diferenciar as condições do meio. Um estudo direcionado ao revestimento é fundamental para a continuidade desta pesquisa. Ainda, deve-se estudar melhor os mecanismos de degradação para garantir a efetividade dos sensores em longos períodos de operação.

Ao final, todos os objetivos propostos desta tese são explicados e comprovados. O dispositivo de detecção da presença de água na região do anular de dutos flexíveis com uso de sistemas com identificação por radiofrequência é uma realidade e a constatação científica é válida. Mais estudos e aprimoramentos nos sensores e nos leitores podem levar à ampliação de distância de leitura e sensibilidade. Além disso, o conteúdo desta tese pode fomentar discussões e contribuir para idealizar novas aplicações. Afinal, a pesquisa é um processo permanentemente inacabado (GERHARDT, 2009).

## 6. TRABALHOS FUTUROS

Como sugestões para trabalhos futuros estão:

- Seleção e teste de novos revestimentos para os sensores;

Com a ocorrência da falha dos revestimentos novos materiais deverão ser testados. Dentre as características desejáveis estão materiais com flexibilidade e alto grau de hidrofobicidade. A possibilidade de uso de revestimentos mais rígidos também não é descartada, uma vez que os sensores podem ser fabricados com a curvatura com a qual serão inseridos no duto flexível.

- Teste de longa duração em meio aquoso;

Estas novas versões dos sensores deverão ser estudadas novamente em meio aquoso por períodos de tempo determinados. Além disso, no meio de estudo devem ser inseridos gases oriundos do processo de exploração como CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>S e assim, verificar se estes gases dissolvidos na água do mar irão degradar os revestimentos e o sensor.

- Ensaios mecânicos;

Durante o processo de fabricação e instalação são impostos altos valores de carga sobre o duto flexível, esforços de esmagamento e flexão. Assim, verificar se os sensores são capazes de resistir a estes esforços com ensaios mecânicos representativos em segmentos de dutos flexíveis é imprescindível.

- Marinização do equipamento de aquisição de dados;

Qualificar para determinadas profundidades todos os equipamentos eletrônicos que irão realizar a coleta de dados.

- Teste em escala real.

Inserir sensores em trecho de duto flexível, durante o processo de fabricação do mesmo. Realizar o monitoramento do parâmetro S11 deste sensor em toda a sua rota, desde fabricação, enrolamento, transporte e instalação. Monitorar a condição do anular do duto flexível em operação.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABGP – Associação Brasileira de Geólogos de Petróleo – Nota técnica sobre a margem equatorial brasileira – “Um novo “pré-sal” no arco norte do território brasileiro?”. 2021
- ALAMIN, M. et al. Corrosion detection using low-frequency RFID technology. **Insight: Non-Destructive Testing and Condition Monitoring**, [s. l.], v. 54, n. 2, p. 72–75, 2012.
- ALBINO, J. C. R. **Materiais com Gradação Funcional no Comportamento Dinâmico de Linhas Flexíveis**. 2011. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, [s. l.], 2011.
- BAI, Y.; BAI, Q. **Subsea pipelines and risers**. Oxford. v. 53
- BENELLI, G.; POZZEBO, A. RFID Under Water: Technical Issues and Applications. In: **Radio Frequency Identification from System to Applications**. [s.l.] : InTech, 2013. p. 395.
- BERGE, S. et al. **Handbook on Design and Operation of Flexible Pipes**. Trondheim: SINTEF Ocean, 2017.
- BORGES, M. F. **Correlação numérica-experimental da redução da vida em fadiga de dutos flexíveis operando com anular alagado na presença de CO<sub>2</sub>**. 2017. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, [s. l.], 2017. Disponível em: <<https://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/172110>>
- BOSCHEE, P. A. M. Best Practices for flexible Pipe Integrity - Evolve. **Oil & Gas Facilities**, [s. l.], p. 21, 2012.
- BOWICK, C. **RF Circuit Design**. [s.l.] : Newnes, 1982. v. 58
- BUENO, A. F. B. **Avaliação das armaduras de tração de riser flexível durante ensaios axiais de tração e fadiga**. 2010. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, [s. l.], 2010. Disponível em: <<https://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/24713>>
- BUTLER, J. C. et al. Inductive Strain Sensor. **Sensors And Actuators**, [s. l.], v. 102, p. 61–66, 2002.
- CAIZZONE, S.; DIGIAMPAOLO, E. Wireless Passive RFID Crack Width Sensor for Structural Health Monitoring. **IEEE Sensors Journal**, [s. l.], v. 15, n. 12, p. 6767–6774, 2015.
- CHANG, K.; KIM, Y.; YOON, Y. Functional antenna integrated with relative humidity sensor using synthesised polyimide for passive RFID sensing. **Electronics Letters**, [s. l.], v. 41, n. 2, p. 40–41, 2007.
- CHEN, W.-K. **The Electrical Engineering Handbook**. [s.l.] : Elsevier Academic Press, 2004.
- CUI, L. et al. Radio frequency identification and sensing techniques and their applications—A review of the state-of-the-art. **Sensors (Switzerland)**, [s. l.], v. 19, n. 18, 2019.
- CURTY, J.-P. et al. **Design and Optimization of Passive UHF RFID Systems**. New York: Springer Science-FBusiness Media, LLC, 2007.
- DA SILVA, E. **High Frequency and Microwave Engineering**. [s.l: s.n.]. v. 39
- DALIRI, A.; WANG, C. H.; ROWE, W. S. T. WIRELESS STRAIN SENSORS USING

ELECTROMAGNETIC RESONATORS Ali. In: 2016, **Anais...** [s.l: s.n.]

DE MATTOS DIAS, J. L.; QUAGLINO, M. A. **A questao do petróleo no Brasil: Uma história da Petrobrás**. Rio de Janeiro: Fundação Getulio Vargas - Petróleo Brasileiro S.A, 1993. Disponível em: <www.cpdoc.fgv.br>

DE MULDER, E. et al. Case study : A class E Power amplifier for ISO-14443A. In: proceedings of the 2009 ieeesymposium on design and diagnostics of electronic circuits and systems, ddec2009 , **IEEE**, 2009.

DEAN, R. N. et al. A capacitive fringing field sensor design for moisture measurement based on printed circuit board technology. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, [s. l.], v. 61, n. 4, p. 1105–1112, 2012.

DENG, F. et al. A CMOS humidity sensor for passive RFID sensing applications. **Sensors (Switzerland)**, [s. l.], v. 14, n. 5, p. 8728–8739, 2014.

DONG, L. et al. Mutual inductance suppressed stacked inductors for passive wireless multi-parameter sensors. **Proceedings of IEEE Sensors**, [s. l.], v. 2014-Decem, n. December, p. 926–929, 2014.

DONG, L. et al. Multi-Parameters Detection Implemented by LC Sensors with Branching Inductors. **IEEE Sensors Journal**, [s. l.], v. 19, n. 1, p. 304–310, 2019.

EREN, H.; SANDOR, L. D. Fringe-effect capacitive proximity sensors for tamper proof enclosures. **Proceedings of the ISA/IEEE 2005 Sensors for Industry Conference, Sicon'05**, [s. l.], n. February, p. 22–26, 2005.

ERIKSEN, M. Omae2014-24147 **Outer Cover Damages on Flexible Pipes – Corrosion and Integrity**. In: proceedings of the asme 2014 33rd international conference on ocean, offshore and arctic engineering 2014, San Francisco.

FENG, Yi et al. Low-cost printed chipless RFID humidity sensor tag for intelligent packaging. **IEEE Sensors Journal**, v. 15, n. 6, p. 3201-3208, 2014.

FERNÁNDEZ-SALMERÓN, J. et al. HF RFID Tag as Humidity Sensor: Two Different Approaches. **IEEE Sensors Journal**, [s. l.], v. 15, n. 10, p. 5726–5733, 2015.

FINKENZELLER, K. **RFID Handbook: Fundamentals and Applications in Contactless Smart Cards, Radio Frequency Identification and near-Field Communication**. 3. ed. ed. Chichester.

FONTANA, W. A. **EMPREGO DE CABOS DE AÇO COMO ARMADURA DE TRACÇÃO PARA A APLICAÇÃO EM DUTOS FLEXÍVEIS**. 2013. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, [s. l.], 2013. Disponível em: <<https://lume.ufrgs.br/handle/10183/87269>>

FRANZINI, G. R. et al. Crushing of flexible pipes under traction: A theoretical-experimental assessment. **Proceedings of the International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering - OMAE**, [s. l.], v. 4, n. July 2018, p. 503–512, 2011.

GERHARDT, Tatiana Engel; SILVEIRA, Denise Tolfo. **Métodos de pesquisa**. Plageder, 2009.

GLOVER, B.; BHATT, H. **RFID essentials**. Sebastopol: O'Reilly Media, Inc., 2006.

HARPSTER, T. J. et al. A passive humidity monitoring system for in situ remote wireless testing of micropackages. **Journal of Microelectromechanical Systems**, [s. l.], v. 11, n. 1, p. 61–67, 2002.

HBM. **HBM strain gauges**. [s.l: s.n.].

HU, X.; YANG, W. Planar capacitive sensors - Designs and applications. **Sensor Review**, [s. l.], v. 30, n. 1, p. 24–39, 2010.

JIA, Y. et al. A prototype RFID humidity sensor for built environment monitoring. **2008 International Workshop on Education Technology and Training and 2008 International Workshop on Geoscience and Remote Sensing, ETT and GRS 2008**, [s. l.], v. 2, p. 496–499, 2008.

JMU et al. **Un-bonded Flexible Risers – Recent Field Experience and Actions for Increased Robustness**. Nesbru. Disponível em: <[http://www.ptil.no/getfile.php/1326003/PDF/Rapporter/4Ssubsea\\_PSA-Norway\\_Flexible\\_s-rev5.pdf](http://www.ptil.no/getfile.php/1326003/PDF/Rapporter/4Ssubsea_PSA-Norway_Flexible_s-rev5.pdf)>.

KAISER, K. L. **Electromagnetic Compatibility Handbook**. [s.l.] : CRC Press, 2005. v. 6

KALANSURIYA, P.; BHATTACHARYYA, R.; SARMA, S. RFID tag antenna-based sensing for pervasive surface crack detection. **IEEE Sensors Journal**, [s. l.], v. 13, n. 5, p. 1564–1570, 2013.

KHALIFEH, R. et al. Development of wireless and passive corrosion sensors for material degradation monitoring in coastal zones and immersed environment. **IEEE Journal of Oceanic Engineering**, [s. l.], v. 41, n. 4, p. 776–782, 2016.

KHAN, A. **Microwave Engineering - Concepts and Fundamentals**. [s.l.] : Taylor & Francis Group, LLC, 2014. v. 1

KUHN, M. F.; JACQUES, R. C.; CLARKE, T. G. R. Preliminary Study of an Underwater Wireless Sensor Designed for Interrogating the Environmental Condition of Flexible Pipe Annulus. **Journal of Nondestructive Evaluation**, [s. l.], v. 38, n. 2, p. 1–11, 2019.

LAMEF - Laboratório de Metalurgia Física - Universidade Federal do Rio Grande do Sul - Acervo interno, 2020.

LAU, SIOW SHYONG. Practical design of 13.56 MHz Near Field Communication (NFC) and Radio Frequency Identification (RFID) antenna using ferrite sheet on metallic surface by Network Analyzer. In: **2015 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM)**. IEEE, 2015. p. 1362-1366.

LEROY, J.-M.; ESTRIER, P. Calculation of Stresses and Slips in Helical Layers of Dynamically Bent Flexible Pipes. **Oil & Gas Science and Technology**, [s. l.], v. 56, n. 6, p. 545–554, 2001.

LOGAN, D. L. **A First Course in the Finite Element Method**. [s.l: s.n.]. v. 66

LUVISI, A.; PANATTONI, A.; MATERAZZI, A. RFID temperature sensors for monitoring soil solarization with biodegradable films. **Computers and Electronics in Agriculture**, [s. l.],

- v. 123, p. 135–141, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.compag.2016.02.023>>
- MAHBOOB, M. R.; ISLAM, T.; KHAN, M. A. A semi flexible integrated wireless humidity sensor. **12th IEEE International Conference Electronics, Energy, Environment, Communication, Computer, Control: (E3-C3), INDICON 2015**, [s. l.], p. 1–5, 2016.
- MANZARI, S. et al. Development of an UHF RFID chemical sensor array for battery-less ambient sensing. **IEEE Sensors Journal**, [s. l.], v. 14, n. 10, p. 3616–3623, 2014.
- MARINDRA, A. M. J.; TIAN, G. Y. Chipless RFID Sensor Tag for Metal Crack Detection and Characterization. **IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques**, [s. l.], v. 66, n. 5, p. 2452–2462, 2018.
- MARINHO, M. G.; DOS SANTOS, J. M.; CARNEVAL, R. D. O. Integrity assessment and repair techniques of flexible risers. In: proceedings of the international conference on offshore mechanics and arctic engineering - omae 2006, Hamburg
- MARIOLI, D.; SARDINI, E.; SERPELLONI, M. An inductive telemetric measurement system for humidity sensing. **Measurement Science and Technology**, [s. l.], v. 19, n. 11, 2008.
- MARTUZA, M. A. et al. Wireless LC-Type passive humidity sensor using large-area RF magnetron sputtered ZnO Films. **IEEE Transactions on Electron Devices**, [s. l.], v. 65, n. 8, p. 3447–3453, 2018.
- MAVADDAT, R. **Network Scattering Parameters**. 2. ed. [s.l.] : World Scientific, 1996.
- MEHDIZADEH, M. **Microwave/RF Applicators and Probes for Material Heating, Sensing, and Plasma Generation: Second Edition**. [s.l: s.n.].
- MENG, Z.; LI, Z. RFID Tag as a Sensor - A Review on the Innovative Designs and Applications. **Measurement Science Review**, [s. l.], v. 16, n. 6, p. 305–315, 2016.
- MERILAMPI, S. et al. Embedded wireless strain sensors based on printed RFID tag. **Sensor Review**, [s. l.], v. 31, n. 1, p. 32–40, 2011.
- MERILAMPI, S. et al. Passive UHF RFID strain sensor tag for detecting limb movement. **International Journal on Smart Sensing and Intelligent Systems**, [s. l.], v. 5, n. 2, p. 315–328, 2012.
- MINERALS MANAGEMENT SERVICE. Gulf of Mexico Deepwater Operations and Activities Environmental Assessment. **U.S. Department of the Interior Minerals Management Service Gulf of Mexico OCS Region**, [s. l.], n. MMS 2000-001, p. 248, 2000.
- MOORE, R. K. Radio communication in the sea. **Ieee Spectrum**, [s. l.], v. 4, n. 11, p. 42–51, 1967.
- NOTT, P.; MCNAB, J. OMAE2016-54781. In: proceedings of the asme 2016 35th international conference on ocean, offshore and arctic engineering omae2016 2016, Busan. **Anais... Busan**
- O'BRIEN, P.; PICKSLEY, J.; OFIICE, H. **State-of-the-Art Flexible Riser Integrity Issues Study Report**. Aberdeen. Disponível em: <<http://www.ukooa.co.uk/issues/fps0/docs/flexiblepipestudy.pdf>>.
- OCCHIUZZI, C. et al. CNT-based RFID passive gas sensor. **IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest**, [s. l.], p. 1–4, 2011.

- ONG, K. G. et al. Design and application of a wireless, passive, resonant-circuit environmental monitoring sensor. **Sensors and Actuators, A: Physical**, [s. l.], v. 93, n. 1, p. 33–43, 2001.
- ONG, K. G.; GRIMES, C. A. A resonant printed-circuit sensor for remote query monitoring of environmental parameters. **Smart Materials and Structures**, [s. l.], v. 9, p. 421–428, 2000.
- OPREA, A. et al. Capacitive humidity sensors on flexible RFID labels. **Sensors and Actuators, B: Chemical**, [s. l.], v. 132, n. 2, p. 404–410, 2008.
- ORTIZ NETO, J. B.; COSTA, A. J. D. A Petrobrás e a exploração de petróleo offshore no Brasil: um approach evolucionário. **Revista Brasileira de Economia**, [s. l.], v. 61, n. 1, p. 95–109, 2007. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0034-71402007000100006&lng=pt&nrm=iso&tlng=pt](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0034-71402007000100006&lng=pt&nrm=iso&tlng=pt)>
- POTYRAILO, R. A. et al. Battery-free radio frequency identification (RFID) sensors for food quality and safety. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, [s. l.], v. 60, n. 35, p. 8535–8543, 2012.
- POTYRAILO, R. A.; MOUQUIN, H.; MORRIS, W. G. Position-independent chemical quantitation with passive 13.56-MHz radio frequency identification (RFID) sensors. **Talanta**, [s. l.], v. 75, n. 3, p. 624–628, 2008.
- POZZEBON, A. Bringing near field communication under water: Short range data exchange in fresh and salt water. **2015 5th International EURASIP Workshop on RFID Technology, EURFID 2015**, [s. l.], p. 152–156, 2015.
- QI, Z. et al. Full passive UHF RFID Tag with an ultra-low power, small area, high resolution temperature sensor suitable for environment monitoring. **Microelectronics Journal**, [s. l.], v. 45, n. 1, p. 126–131, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.mejo.2013.10.010>>
- RADOVANOVIĆ, M. R. et al. Characterization of LC sensor structures realized by PCB and LTCC technology for determining moisture in building materials. **Processing and Application of Ceramics**, [s. l.], v. 12, n. 1, p. 13–20, 2018.
- RAO, S. S. **The Finite Element Method in Engineering**. 6.ed. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2011.
- ROBBINS, A. H.; MILLER, W. C. **CIRCUIT ANALYSIS - THEORY AND PRACTICE**. [s.l.] : CENGAGE Learning, 2013.
- SADIKU, M. N. O. **Elements of Electromagnetics**. [s.l: s.n.]. v. 6
- SANGHERA, P. et al. **Deploying and Securing RFID book**. Burlington: Syngress Publishing, Inc., 2007.
- SCHMITT, R. **ELECTROMAGNETICS EXPLAINED**. [s.l.] : Newnes, 2002.
- SHEPARD, S. **RFID - Radio Frequency Identification**. New York: McGraw-Hill, 2005.
- SHOAIB, N. **Vector Network Analyzer ( VNA ) Measurements and Uncertainty Assessment**. [s.l: s.n.].
- SIMONSEN, A. Inspection and Monitoring Techniques for un-bonded Flexible Risers and Pipelines. [s. l.], p. 76, 2014.

STEFFEN, P.; REINHOLD, P. **Grundlagen der Elektrotechnik und Elektronik 1**. 4. ed. ed. [s.l.] : Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010. Disponível em: <<https://www.springer.com/us/book/9783540690788>>

STEPHEN B, Miles et al. RFID technology and applications. Cambridge University Press, 2008.

STOJANOVIĆ, G. et al. Monitoring of water content in building materials using a wireless passive sensor. **Sensors**, [s. l.], v. 10, n. 5, p. 4270–4280, 2010.

TAN, E. L. et al. A wireless, passive sensor for quantifying packaged food quality. **Sensors**, [s. l.], v. 7, n. 9, p. 1747–1756, 2007.

UHL, T.; LISOWSKI, M. Wireless passive sensor for crack detection - conception and investigations. **Pomiar Automatyka Kontrola**, [s. l.], v. 58, n. 8, p. 991–993, 2012.

WANG, L. K.; YANG, C. T. **Handbook of Environmental Engineering - Advances in Water Resources Engineering**. [s.l.] : Springer International Publishing Switzerland, 2015.

WANG, X. et al. An all-printed wireless humidity sensor label. **Sensors and Actuators, B: Chemical**, [s. l.], v. 166–167, p. 556–561, 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.snb.2012.03.009>>

WEINER, M. M.; DEKKER, M. **Monopole Antennas**. New York: Marcel Dekker Inc, 2006. v. 48

XAVIER, F. G. **AVALIAÇÃO DA VIDA EM FADIGA DE UM NOVO MODELO DE TERMINAL CONECTOR PARA DUTOS FLEXÍVEIS**. 2009. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, [s. l.], 2009. Disponível em: <<lume.ufrgs.br/handle/10183/17492>>

XIE, M. Z. et al. Low Cost Paper-Based LC Wireless Humidity Sensors and Distance-Insensitive Readout System. **IEEE Sensors Journal**, [s. l.], v. 19, n. 12, p. 4717–4725, 2019.

YANG, L. et al. A novel conformal RFID-enabled module utilizing inkjet-printed antennas and carbon nanotubes for gas-detection applications. **IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters**, [s. l.], v. 8, p. 653–656, 2009.

YI, X. et al. Passive wireless smart-skin sensor using RFID-based folded patch antennas. **International Journal of Smart and Nano Materials**, [s. l.], v. 2, n. 1, p. 22–38, 2011.

ZARIFI, M. H.; DEIF, S.; DANESHMAND, M. Wireless passive RFID sensor for pipeline integrity monitoring. **Sensors and Actuators, A: Physical**, [s. l.], v. 261, p. 24–29, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.sna.2017.04.006>>

ZHANG, C. et al. An LC-type passive wireless humidity sensor system with portable telemetry unit. **Journal of Microelectromechanical Systems**, [s. l.], v. 24, n. 3, p. 575–581, 2015.

ZHANG, H. et al. Identification and characterisation of steel corrosion using passive high frequency RFID sensors. **Measurement: Journal of the International Measurement Confederation**, [s. l.], v. 92, p. 421–427, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.measurement.2016.06.041>>

ZHANG, H.; MENG, F. Exploiting the skin effect using radio frequency communication in underwater communication. **Proceedings of the 2012 International Conference on**

**Industrial Control and Electronics Engineering, ICICEE 2012**, [s. l.], n. 9, p. 1150–1153, 2012.

ZHANG, J. et al. **A review of passive RFID tag antenna-based sensors and systems for structural health monitoring applications**. [s.l: s.n.]. v. 17

ZHANG, J.; TIAN, G. Y. UHF RFID Tag Antenna-Based Sensing for Corrosion Detection & Characterization Using Principal Component Analysis. **IEEE Transactions on Antennas and Propagation**, [s. l.], v. 64, n. 10, p. 4405–4414, 2016.

ZHANG, J.; TIAN, G. Y.; ZHAO, A. B. Passive RFID sensor systems for crack detection & characterization. **NDT and E International**, [s. l.], v. 86, n. December 2015, p. 89–99, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ndteint.2016.11.002>>

ZHANG, Y. et al. **State of the art analytical tools improve optimization of unbonded flexible pipes for deepwater environments**. In: proceedings of the annual offshore technology conference 2003, Houston.