



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO  
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA  
MESTRADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

MATEUS HENRIQUE AMORIM MEDEIROS MELO

**PROPOSTA DE DETECÇÃO DE COBRE NA ÁGUA POR  
SENSORES COM RESSONADOR DE ANEL FENDIDO**

MOSSORÓ

2024

MATEUS HENRIQUE AMORIM MEDEIROS MELO

**PROPOSTA DE DETECÇÃO DE COBRE NA ÁGUA POR  
SENSORES COM RESSONADOR DE ANEL FENDIDO**

Dissertação de mestrado acadêmico apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito à obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Linha de Pesquisa: Telecomunicações e Eletromagnetismo Aplicado.

Orientador: Isaac Barros Tavares da Silva, Prof. Dr.

MOSSORÓ

2024

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

M528p Melo, Mateus Henrique Amorim Medeiros.  
Proposta de Detecção de Cobre na Água por  
Sensores com Ressonador de Anel Fendido / Mateus  
Henrique Amorim Medeiros Melo. - 2024.  
64 f. : il.

Orientador: Isaac Barros Tavares da Silva.  
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal  
Rural do Semi-árido, Programa de Pós-graduação em  
Engenharia Elétrica, 2024.

1. CSRR. 2. Caracterização dielétrica. 3.  
Sensoriamento de micro-ondas. 4. Deslocamento de  
frequência de ressonância. 5. Monitoramento de  
qualidade da água. I. Silva, Isaac Barros Tavares  
da, orient. II. Título.

Ficha catalográfica elaborada por sistema gerador automático em conformidade  
com AACR2 e os dados fornecidos pelo autor(a).  
Biblioteca Campus Mossoró / Setor de Informação e Referência  
Bibliotecária: Keina Cristina Santos Sousa e Silva  
CRB: 15/120

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

MATEUS HENRIQUE AMORIM MEDEIROS MELO

## PROPOSTA DE DETECÇÃO DE COBRE NA ÁGUA POR SENSORES COM RESSONADOR DE ANEL FENDIDO

Dissertação de mestrado acadêmico apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito à obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Linha de Pesquisa: Telecomunicações e Eletromagnetismo Aplicado.

Defendida em: 31/01/2024

### BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente  
 ISAAC BARROS TAVARES DA SILVA  
Data: 31/01/2024 16:35:21-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Isaac Barros Tavares da Silva (UFERSA)

Documento assinado digitalmente  
 SAMANTA MESQUITA DE HOLANDA  
Data: 31/01/2024 21:20:39-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. Samanta Mesquita de Holanda (UFERSA)

Documento assinado digitalmente  
 HUMBERTO DIONISIO DE ANDRADE  
Data: 01/02/2024 08:30:09-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Humberto Dionísio de Andrade (UFERSA)

Documento assinado digitalmente  
 IDALMIR DE SOUZA QUEIROZ JUNIOR  
Data: 01/02/2024 07:12:22-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Idalmir de Souza Queiroz Júnior (UFERSA)

Documento assinado digitalmente  
 ELIAS MARQUES FERREIRA DE OLIVEIRA  
Data: 31/01/2024 19:37:22-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Elias Marques Ferreira de Oliveira (UFRPE)

## AGRADECIMENTOS

Com o coração cheio de gratidão, deixo registrado neste trabalho os agradecimentos àqueles que me veem à memória que participaram dessa construção de muitas mãos.

Ao meu orientador, professor Isaac, por entre inúmeras contribuições e ajudas, ter guiado meu caminho na pós-graduação, com atenção, paciência, disponibilidade, sensibilidade e gentileza ao longo de toda a execução desse mestrado.

Aos professores do Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica da UFERSA, pelos ensinamentos e esforços prestados a este curso, em especial à professora Samanta, que dedicou especial atenção à minha qualificação e facilitou o desenvolvimento da dissertação. Agradeço também as contribuições do Professor Elias, pelas contribuições sugeridas durante a defesa.

Aos meus colegas Adna, Leonardo, Nikson e Rosenildo pela companhia, atenção e disponibilidade sem contrapartida prestada nas disciplinas e nos usos de *softwares* e dos equipamentos do LabMicro na UFERSA que foram bases deste trabalho.

Aos meus pais, Dario e Higia, e meus familiares Elaine, Célia e Pedro, pela cooperação e apoio em nosso convívio, sem os quais não teria chegado nem perto de cumprir este objetivo. Ele é uma conquista compartilhada e merecida a esse grupo de pessoas que se amam e se ajudam.

À minha companheira, Érica, por ter acolhido minhas reclamações, desabafos e lamentações e ter me fortalecido do início ao fim deste período de dois anos. Não há palavras que descrevam sua importância para a existência desta dissertação e para o amor que sinto neste momento.

Aos amigos encarnados e desencarnados deste universo maravilhoso de aprendizado regido pela lei divina do Amor.

## RESUMO

A água é um recurso cada vez mais escasso e, para manutenção da sua qualidade, ela precisa ser monitorada. Um dos seus contaminantes é o cobre. Os órgãos nacionais e internacionais fornecem limites máximos para a concentração desse metal pesado e técnicas como a espectrometria são as mais utilizadas para medi-la. Recentemente, técnicas de identificação de materiais pela sua caracterização dielétrica tem sido alvos de estudos, sobretudo os que realizam essa caracterização a partir de parâmetros como a frequência de ressonância de antenas de microfita. Este trabalho tem como objetivo desenvolver um sensor que determine a concentração de cobre em uma amostra de água contaminada a partir do deslocamento da frequência ressonante na curva do coeficiente de reflexão. A partir de uma revisão bibliográfica foram propostas três geometrias de Antenas com Ressonador de Anel Fendido Complementar. Esses dispositivos foram modelados e tiveram suas curvas de coeficiente de reflexão simuladas. Eles também foram fabricados em três protótipos e cada um deles teve a curva de coeficiente de reflexão medida três vezes. Os resultados medidos e simulados obtiveram valores próximos e corresponderam à tendência fundamentada na teoria de que a diminuição da permissividade pelo aumento da concentração de cobre na água provoca um aumento da frequência ressonante. Nas simulações, a faixa de 0 mg/L a 2 mg/L foi a que obteve o maior deslocamento de frequência na média de todos os protótipos. Nas medições, nessa faixa ocorreu o segundo maior deslocamento. Os deslocamentos de frequência de ressonância foram analisados a partir de regressão linear, obtendo-se modelos de retas ajustadas, cuja inclinação e valor de  $R^2$  foram interpretados como, respectivamente, sensibilidade do protótipo e confiabilidade do modelo. Os modelos dos protótipos circulares foram os mais sensíveis e os quadrados os mais confiáveis. Considerando o passo da medição de 4,79 MHz, os formatos circular, octogonal e quadrado alcançaram a sensibilidade capaz de verificar uma mudança de concentração de, respectivamente, 145  $\mu\text{g/L}$ , 293  $\mu\text{g/L}$  e 523  $\mu\text{g/L}$  de cobre na água, sendo, então, todos suficientes para detectar os limites máximos estabelecidos pelos órgãos.

**Palavras-chave:** CSRR. Caracterização dielétrica. Sensoriamento de micro-ondas. Deslocamento de frequência de ressonância, Monitoramento de qualidade da água.

## ABSTRACT

The water is an increasingly scarce resource and, for the maintenance of its quality, it needs to be monitored. One of its contaminants is copper. National and international organizations provide maximum limits for the concentration of this heavy metal, and techniques such as spectrometry are the most commonly used to measure it. Recently, techniques for identifying materials based on their dielectric characterization have been the subject of studies, particularly those that perform this characterization using parameters such as the resonance frequency of microstrip antennas. This work aims to develop a sensor that determines the concentration of copper in a sample of contaminated water based on the shift in resonant frequency in the reflection coefficient curve. Three geometries of Complementary Split Ring Resonator antennas were proposed based on a literature review. These devices were modeled and their reflection coefficient curves were simulated. Each one of them was also manufactured in three prototypes, and each of them had the reflection coefficient curve measured three times. The measured and simulated results obtained values close to each other and corresponded to the trend based on the theory that the decrease in permittivity due to the increase in copper concentration in water causes an increase in resonant frequency. In simulations, the range from 0 mg/L to 2 mg/L yielded the highest frequency shift on average of all prototypes. In measurements, this range exhibited the second-highest shift, behind only the from 4 mg/L to 6 mg/L. Resonance frequency shifts were analyzed using linear regression, obtaining fitted line models, whose slope and  $R^2$  value were interpreted as prototype sensitivity and model reliability, respectively. The circular prototypes models were the most sensitive, while the square ones were the most reliable. Considering the measurement step of 4.79 MHz, the circular, octagonal, and square shapes achieved the sensitivity to detect a concentration change of 145  $\mu\text{g/L}$ , 293  $\mu\text{g/L}$ , and 523  $\mu\text{g/L}$  of copper in the water, respectively. Therefore, all of them are sufficient to detect the maximum limits established by the authorities.

**Palavras-chave:** CSRR. Dielectric Characterization. Microwave sensing. Resonance Frequency Shift. Water quality monitoring.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Diagrama de blocos da Espectrometria de Absorção Atômica por Chama...	14
Figura 2 - Ilustração de um espectrofômetro.....	15
Figura 3 - Exemplo de espectro de massa. ....	16
Figura 4 - Configuração de uma antena de microfita. ....	21
Figura 5 - Diagrama de uma rede de N portas.....	21
Figura 6 - Representação de uma antena de microfita pelo Modelo da Linha de Transmissão. ....	23
Figura 7 - Efeito de franjamento em antenas de microfita. ....	23
Figura 8 - Sensor proposto por Haq <i>et al.</i> (2019) em sua visão (a) em perspectiva, (b) a partir do plano de terra e (c) lateral. ....	25
Figura 9 - Curvas de coeficiente de transmissão para diferentes MUTs dielétricos obtidas por Haq <i>et al.</i> (2019). ....	26
Figura 10 - Sensor proposto por Oliveira <i>et al.</i> (2020). ....	27
Figura 11 - Deslocamentos de frequência ressonante dos MUTs observados por Oliveira <i>et al.</i> (2020). ....	28
Figura 12 - Fluxograma da metodologia utilizada. ....	30
Figura 13 - Agitação magnética para diluição de cobre nas suspensões. ....	31
Figura 14 - Configuração utilizada para a caracterização dos materiais. ....	32
Figura 15 - Geometria proposta para o sensor com CSRR circular (a) na vista superior e (b) no Corte AA'. ....	33
Figura 16 - Geometria proposta para os sensores com CSRR octogonal e quadrado. ...	34
Figura 17 - Impressora 3D, modelo Tevo Tarantula utilizada para confecção do substrato de PLA. ....	34
Figura 18 - Protótipos dos sensores fabricados. ....	35
Figura 19 - Configuração utilizada para a medição do coeficiente de reflexão dos protótipos. ....	36
Figura 20 - Permissividade real $\epsilon'$ das suspensões. ....	38
Figura 21 - Tangente dielétrica de perdas $\tan \delta$ das suspensões.....	39
Figura 22 - Permissividade real $\epsilon'$ dos substratos dos protótipos. ....	40
Figura 23 - Deslocamentos de frequência de ressonância a partir dos valores simulados em relação à (a) $f_0$ e a (b) $f_V$ .....	45

Figura 24 - Deslocamentos de frequência de ressonância a partir das médias dos valores medidos em relação à (a) $f_0$ e a (b) $f_V$ .....	47
Figura 25 - Curvas do coeficiente de reflexão para o protótipo C1. ....	56
Figura 26 - Curvas do coeficiente de reflexão para o protótipo C2. ....	57
Figura 27 - Curvas do coeficiente de reflexão para o protótipo C3. ....	58
Figura 28 - Curvas do coeficiente de reflexão para o protótipo O1. ....	59
Figura 29 - Curvas do coeficiente de reflexão para o protótipo O2. ....	60
Figura 30 - Curvas do coeficiente de reflexão para o protótipo O3. ....	61
Figura 31 - Curvas do coeficiente de reflexão para o protótipo Q1. ....	62
Figura 32 - Curvas do coeficiente de reflexão para o protótipo Q3. ....	63
Figura 33 - Curvas do coeficiente de reflexão para o protótipo Q3. ....	64

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	9
1.1. OBJETIVOS .....	10
1.1.1. Objetivo geral .....	11
1.1.2. Objetivos específicos.....	11
<b>2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	12
2.1. CONTAMINAÇÃO DE COBRE NA ÁGUA.....	12
2.2. PROPRIEDADES DIELÉTRICAS DE MATERIAIS.....	16
2.3. ANTENAS DE MICROFITA E ELEMENTOS META-INSPIRADOS .....	20
2.4. SENSORIAMENTO COM ANTENAS DE MICROFITA E ELEMENTOS META-INSPIRADOS .....	25
<b>3. METODOLOGIA</b> .....	30
3.1. PREPARO E CARACTERIZAÇÃO DAS SUSPENSÕES DE COBRE .....	30
3.2. PROPOSTA DE SENSORES BASEADOS NO DESLOCAMENTO DE FREQUÊNCIA .....	32
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	38
<b>5. CONCLUSÕES</b> .....	51
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	53
<b>APÊNDICE A – CURVAS DE COEFICIENTE DE REFLEXÃO MEDIDAS E SIMULADAS PARA CADA PROTÓTIPO</b> .....	56

## 1. INTRODUÇÃO

O aumento da população mundial torna a água um bem cada vez mais escasso não só pela diminuição de seu volume e, conseqüentemente, do seu valor *per capita*, mas também pela queda da sua qualidade, através de contaminações. Isso, então, reduz a quantidade disponível de água segura para consumo (FAO, 2017). Como esse cenário é acelerado dado o crescimento exponencial da população, o acompanhamento desse problema precisa acompanhar o mesmo ritmo. Atualmente, o que ocorre para isso são medições escassas no tempo e no espaço (Zhang *et al.*, 2019). Isso põe sob risco o atendimento a padrões mínimos estabelecidos para uso e consumo humano, além da manutenção das vidas aquáticas.

Para contribuir com o aumento dessas medições, é necessário investigar as técnicas utilizadas atualmente para esse fim. Restringindo essa pesquisa na contaminação da água por metais pesados para uma análise mais detalhada, algumas formas de mensurar suas concentrações podem ser citadas, como as de detecção óptica pela absorção, fluorescência e quimioluminescência, as de detecção eletromecânica usando interação entre eletrodos e sondas, além da detecção usando microbalança de cristal de quartzo (Lace; Cleary, 2021).

Levando em consideração preocupações locais dessa contaminação, o Rio Apodi-Mossoró, no Semi-Árido brasileiro, foi estudado em relação às concentrações de metais pesados por Oliveira (2019). Para isso, foram recolhidas amostras em quatorze localidades do rio, coletando-se 150 mL de água em cada. Entre os resultados obtidos, a concentração de cobre foi avaliada acima de 0,03 mg/L em dois locais, configurando-se acima dos limites máximos estabelecidos no país. Destacando-se esse contaminante devido a essa preocupação regional, as técnicas mais utilizadas para a medição de sua concentração são aquelas que se utilizam de espectrometria (Organização Mundial da Saúde, 2022), que são caras e complexas.

Considerando a necessidade de melhor monitoramento no tempo e no espaço, aumenta-se a demanda por novas técnicas de medição de concentração de cobre que sejam de baixo custo, fácil fabricação e baixo consumo de energia de forma a atenderem a escala maior que é requerida. Além disso, precisam ter níveis de confiança de suas medições que justifiquem seu uso em relação às técnicas usuais. Tais características podem ser atendidas através de antenas de microfita, que são dispositivos que são

frequentemente utilizados para sensoriamento, devido a sua versatilidade e atuação em várias faixas de frequências. O sensoriamento através delas acontece quando alterações em sua geometria e composição refletem em mudanças nos seus parâmetros, que são então utilizados como referência. Dessa forma, essas antenas podem ser tratadas como sensores.

Alguns trabalhos analisam a resposta desses sensores ao posicionar diferentes materiais próximos a eles. Por exemplo, Zhang *et al.* (2019) observa o deslocamento na frequência de ressonância de sensores que diferentes concentrações de contaminantes em amostras de água provocam e faz a correlação com esses valores. Outros estudos, ainda, utilizam a resposta do sensor e fazem uma correlação com uma propriedade dielétrica da substância, como Oliveira *et al.* (2020) que observa a correlação de um par de frequências de ressonâncias com a constante dielétrica de amostras de solo com diferentes níveis de umidade, ou Liu, Sun e Xu (2018) que obtém um modelo entre a frequência ressonante e a permissividade de amostras de água com diferentes porcentagens de metanol dissolvido.

Com essas correlações, obtém-se formas alternativas de caracterização de substâncias e de determinação de concentrações de contaminantes, medindo-se apenas as características dielétricas da amostra ao invés da realização de medição convencional. Para aumentar a sensibilidade desses sensores, são utilizados frequentemente elementos meta-inspirados, como o Ressonador de Anel Fendido Complementar, que são mais sensíveis às mudanças nos meios que estão, característica essa que permite, por exemplo, identificar suspensões de cobre na de água com poucos miligramas por litro de diferença entre suas concentrações.

## 1.1. OBJETIVOS

Nesse contexto, o presente trabalho pretende determinar concentrações de cobre em amostras de água a partir de sensores de antenas de microfita. Para isso, é realizada uma fundamentação teórica com apresentação de conceitos necessários e estudos recentes na área, seguida da metodologia adotada. Ao final, são apresentados os resultados obtidos e as conclusões do estudo.

### **1.1.1. Objetivo geral**

Desenvolver um sensor que determine a concentração de cobre em uma amostra de água contaminada a partir do deslocamento da frequência ressonante na curva do coeficiente de reflexão.

### **1.1.2. Objetivos específicos**

- Apresentar uma fundamentação teórica acerca dos limites máximos de concentração de cobre em água regulamentados por órgãos nacionais e internacionais e as técnicas utilizadas para medi-las; e sobre os conceitos sobre antenas de microfita e estudos sobre sua utilização para sensoriamento;
- Preparar e realizar a caracterização dielétrica de suspensões de água contaminadas com cobre;
- Propor uma geometria de sensor que seja capaz de identificar deslocamentos na frequência de ressonância ao serem utilizados sobre as suspensões de água contaminadas;
- Simular e medir a frequência ressonante na curva do coeficiente de reflexão dos sensores;
- Analisar o desempenho dos sensores a partir da correlação entre deslocamento de frequência de ressonância e concentração de cobre na suspensão;
- Observar a influência da alteração do formato do sensor no desempenho obtido.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nessa Fundamentação Teórica, inicialmente são abordados os limites máximos de concentração de cobre na água estabelecidos por órgãos nacionais e internacional e as técnicas usuais utilizadas para suas medições. Por fim, são apresentados conceitos e estudos sobre antenas de microfita e elementos meta-inspirados e seu uso para sensoriamento.

### 2.1. CONTAMINAÇÃO DE COBRE NA ÁGUA

O cobre é classificado como um metal pesado por ser um elemento metálico, com alta densidade e danoso em baixas concentrações (Zhang *et al.*, 2019). Ele comumente constitui encanamentos, válvulas e conexões dos sistemas que distribuem água para os consumidores, sofrendo desgaste por corrosão nesse processo. Dessa forma, o cobre despreendido por isso contamina a água, chegando a atingir concentrações de até 30 mg/L (Organização Mundial da Saúde, 2022).

A água contaminada é utilizada pelas populações, causando manchas em roupas e louças ao ser utilizada para lavagem, além de poder ocasionar mudanças de coloração e de gosto na água potável. Além disso, de acordo com o nível de concentração a que possa ser exposto, um consumidor pode sofrer de irritações gastrointestinais (Organização Mundial da Saúde, 2022).

Esses limites máximos são regulamentados ou sugeridos por organizações internacionais, como a Organização Mundial da Saúde (OMS) e nacionais, como o Ministério da Saúde (MS) e o Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA), a partir do uso da água que contém esse metal.

A OMS, com a finalidade de contribuir para a saúde pública, incentivando o desenvolvimento de padrões e regulações ao redor do mundo, produz normas internacionais sobre a qualidade da água através do seu documento “*Guidelines for drinking-water quality*” (Diretrizes para a qualidade de água potável). O documento também traz as informações que níveis acima de 1 mg/L em águas usadas para lavagem já podem ocasionar manchas nas louças e roupas. Acima de 5 mg/L, já se pode notar em águas potáveis impactos na coloração e no gosto (Organização Mundial da Saúde, 2022).

O documento também traz as informações que níveis acima de 1 mg/L em águas usadas para lavagem já podem ocasionar manchas nas louças e roupas. Acima de 5 mg/L, já se pode notar em águas potáveis impactos na coloração e no gosto (OMS, 2022).

A Tabela 1 reúne os valores determinados pela OMS e alguns outros órgãos com concentrações máximas permitidas para o cobre na água sem que causem danos ao uso para o qual são destinadas.

Tabela 1 – Valores máximos permitidos de concentração de cobre na água por órgãos internacionais, nacionais e estaduais

<b>Documento</b>	<b>Descrição da água</b>	<b>Valores de concentração máximos permitidos (mg/L)</b>
<i>Guidelines for drinking-water quality, 4ª edição - OMS</i>	Águas tratadas para beber	2,0
Portaria 888/2021 - MS	Água para consumo humano	2,0
Resolução 357 do CONAMA	Corpos de água com diferentes finalidades	0,0078 a 0,013
Resolução 396 do CONAMA	Águas subterrâneas para uso de (a) consumo humano, (b) dessedentação de animais, (c) irrigação e (d) recreação	(a) 2,0, (b) 0,5, (c) 0,2 e (d) 1,0
Resolução 397 do CONAMA	Efluentes lançados em corpos de água	1,0

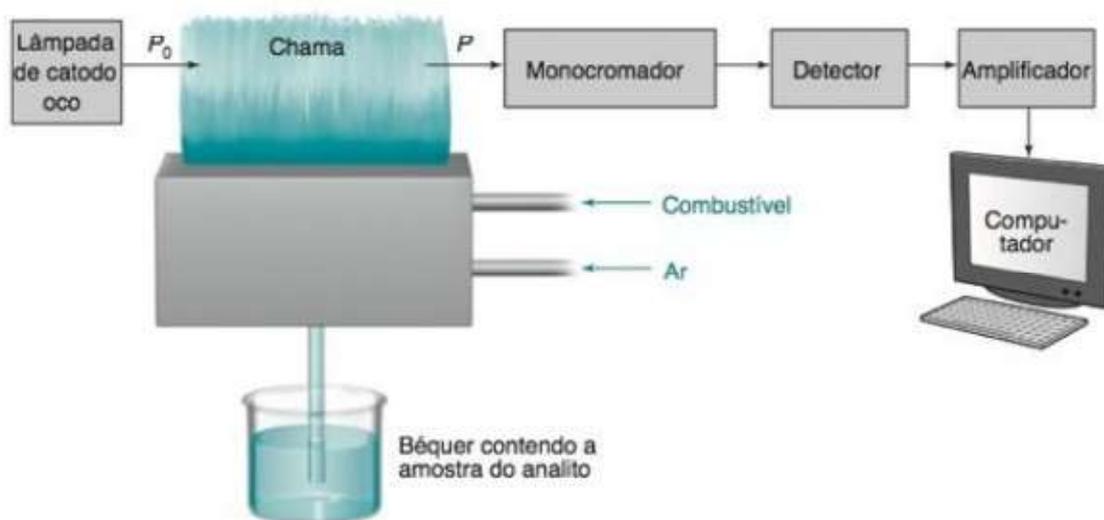
Fonte: Organização Mundial da Saúde (2022), Brasil (2008a), Brasil (2008b) e Brasil (2017).

Observa-se que os valores mostrados na Tabela 1 que dizem respeito ao uso de águas que são de consumo humano se encontram na ordem de grandeza de algumas unidades de miligramas por litro. As técnicas que medem essas concentrações, portanto, devem ter um nível de precisão que detectem essa ordem de grandeza.

Segundo a Organização Mundial da Saúde (2022), são técnicas de medição de cobre na água a Espectrometria de Absorção Atômica por Chama (FAAS, do inglês *Flame Atomic Absorption Spectrometry*), a Espectrometria de Emissão Óptica (ICP-OES, do inglês *Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry*) e a Espectrometria de Massas com Plasma Indutivamente Acoplado (ICP-MS, do inglês *Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry*), que possuem limites de detecção de, respectivamente, 0,5, 0,3  $\mu\text{g/L}$  e 0,02 a 0,1  $\mu\text{g/L}$ . Com essa precisão, essas técnicas conseguem com facilidade identificar os valores máximos regulamentados exibidos na Tabela 1.

Na primeira técnica, a amostra é submetida a ação de uma chama a uma alta temperatura alimentada por combustível e ar. A lâmpada de cátodo oco emite uma radiação luminosa cuja frequência é selecionada por um monocromador. O feixe incide sobre a amostra, sendo parte absorvida para excitação dos átomos, e é transmitido até um detector (Harris, 2001). O diagrama de blocos do processo é mostrado na Figura 1.

Figura 1 - Diagrama de blocos da Espectrometria de Absorção Atômica por Chama.



Fonte: Harris (2001).

A relação entre a frequência do feixe e da energia absorvida caracteriza a concentração do analito – o metal, por exemplo – na amostra através de uma propriedade denominada de absorvidade. Para esse processo, utiliza-se um espectrofotômetro. Quanto mais alta a temperatura da chama, menos interferências há no sinal e mais forte ele se torna, o que permite uma melhor identificação da absorvidade (Harris, 2001). A Figura 2 mostra um espectrofotômetro da marca Varia, modelo AA240FS.

Figura 2 - Ilustração de um espectrofotômetro.

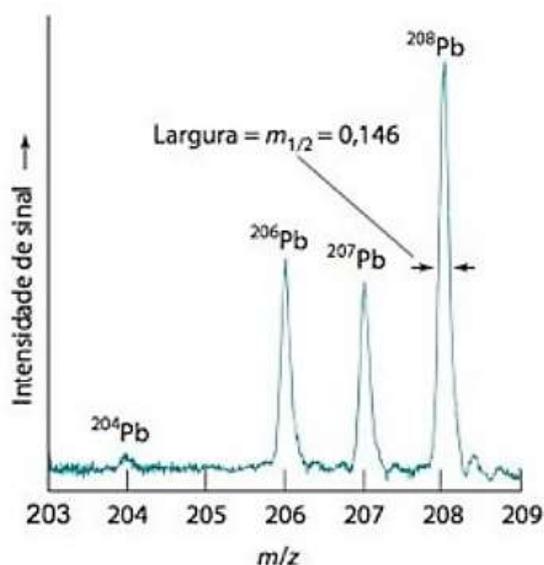


Fonte: UTFPR (2017)

A segunda e a última técnica utilizam Plasma Acoplado Indutivamente, ao invés da chama. Por essa razão, operam com o dobro da temperatura da primeira técnica. Seus instrumentos são, então, mais precisos e, conseqüentemente, mais caros (Harris, 2001).

A última técnica exige a ionização do metal e observa intensidade do espectro de massa que passa pelo detector para a relação entre massa  $m$  e carga elétrica  $z$  para determinação da sua quantidade (Harris, 2001). A Figura 3 mostra um espectro de massa de isótopos de chumbo (Pb) em uma amostra de latão.

Figura 3 - Exemplo de espectro de massa.



Fonte: Harris (2001).

A complexidade dessas técnicas e a necessidade de aumento de monitoramento da contaminação da água ao redor do mundo exigem técnicas alternativas para realizar a medição e acompanhamento da concentração de metais pesados. Uma possibilidade é relacionar o comportamento de suspensões com cobre em diferentes níveis de concentração na faixa de frequência das micro-ondas através das suas propriedades eletromagnéticas.

## 2.2. PROPRIEDADES DIELÉTRICAS DE MATERIAIS

Para compreender as propriedades eletromagnéticas de um meio material, é necessário entendê-lo como um conjunto de átomos, cargas e moléculas. Alguns deles são ligados por suas forças atômicas e moleculares, sendo, por isso, denominadas de cargas ligadas. Algumas podem ser polarizadas, isto é, podem possuir polos elétricos – cargas positivas e negativas  $Q$ , em coulombs, espaçadas por um vetor distância  $\vec{d}$ , em metros – denominadas dipolos. Eles possuem um Momento de dipolo  $\vec{p}$ , em coulomb-metros, dado na Equação 1 (Hayt Jr.; Buck, 2013).

$$\vec{p} = Q\vec{d} \quad (1)$$

Existindo  $n$  dipolos em um volume  $\Delta v$  do material, o Momento total de dipolo  $\vec{p}_{tot}$  é dado pela Equação 2 (Hayt Jr.; Buck, 2013).

$$\vec{p}_{tot} = \sum_{i=1}^{n\Delta v} \vec{p}_i \quad (2)$$

A Polarização  $\vec{P}$ , ou Momento de dipolo por unidade de volume, é dada, então, pela Equação 3, em coulombs por metro quadrado (Hayt Jr.; Buck, 2013).

$$\vec{P} = \lim_{\Delta v \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta v} \sum_{i=1}^{n\Delta v} p_i \quad (3)$$

Para moléculas apolares, então,  $\vec{P}$  é nula. Essa polarização define quanto será acrescido de densidade de linhas de um campo elétrico  $\vec{E}$  aplicado sobre o material, denominada de densidade de fluxo elétrico  $\vec{D}$ , dada pela Equação 4 (Pozar, 2012).

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P} \quad (4)$$

A Polarização gerada pelo campo  $\vec{E}$  pode também ser expressa em função de uma propriedade do material denominada de suscetibilidade elétrica  $\chi_e$ , dada pela Equação 5 (Pozar, 2012).

$$\vec{P} = \epsilon_0 \chi_e \vec{E} \quad (5)$$

Substituindo a Equação 5 na Equação 4, obtém-se a Equação 6.

$$\vec{D} = \epsilon_0 (1 + \chi_e) \vec{E} \quad (6)$$

O fator que relaciona a densidade de fluxo elétrico com o campo elétrico aplicado é a permissividade complexa do material  $\varepsilon$ , decomposta em sua parte real  $\varepsilon'$  e imaginária  $\varepsilon''$ , em Farads por metro (F/m), dada pela Equação 7 (Pozar, 2012).

$$\varepsilon = \varepsilon' + j\varepsilon'' = \varepsilon_0(1 + \chi_e) \quad (7)$$

Dessa forma, pode-se definir a permissividade relativa do material  $\varepsilon_r$ , ou constante dielétrica, adimensional, que relaciona a sua permissividade  $\varepsilon$  com a permissividade do vácuo  $\varepsilon_0$ , através da Equação 8 (Pozar, 2012).

$$\varepsilon_r = 1 + \chi_e \quad (8)$$

Ao analisar um ponto específico, as componentes cartesianas da densidade de fluxo elétrico  $D_x$ ,  $D_y$  e  $D_z$  e do campo elétrico aplicado  $E_x$ ,  $E_y$  e  $E_z$  se relacionam pela Equação 9 (Pozar, 2012).

$$\begin{bmatrix} \vec{D}_x \\ \vec{D}_y \\ \vec{D}_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} & \varepsilon_{xy} & \varepsilon_{xz} \\ \varepsilon_{yx} & \varepsilon_{yy} & \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{zx} & \varepsilon_{zy} & \varepsilon_{zz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vec{E}_x \\ \vec{E}_y \\ \vec{E}_z \end{bmatrix} \quad (9)$$

Caso o material tenha permissividade que não varie com ponto a ponto nem com a direção – condições em que é denominado de, respectivamente, homogêneo e isotrópico, então a relação entre as componentes de  $\vec{D}$  e  $\vec{E}$  se torna a Equação 10 (Pozar, 2012).

$$\begin{bmatrix} \vec{D}_x \\ \vec{D}_y \\ \vec{D}_z \end{bmatrix} = \varepsilon \begin{bmatrix} \vec{E}_x \\ \vec{E}_y \\ \vec{E}_z \end{bmatrix} \quad (10)$$

Além das cargas ligadas, os meios também apresentam cargas livres, cuja quantidade é proporcional à capacidade desse material em ser atravessado por uma corrente elétrica. Essa propriedade é denominada condutividade  $\sigma$ .

Um campo eletromagnético incidente com frequência angular  $\omega$  em um meio material é constituído de campos elétricos  $\vec{E}$  e magnéticos  $\vec{H}$  variáveis no tempo. Eles se relacionam através da Lei de Ampère-Maxwell, dada na Equação 11 (Pozar, 2012).

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = j\omega\vec{D} + \vec{J} \quad (11)$$

A parcela  $\vec{J}$  é definida como a corrente de deslocamento, dada pela Equação 12 (Pozar, 2012).

$$\vec{J} = \sigma\vec{E} \quad (12)$$

Assim, incluindo as características de permissividade complexa  $\varepsilon$  e condutividade  $\sigma$  do meio material, a Equação de Ampère-Maxwell se torna a Equação 13.

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = j\omega\varepsilon\vec{E} + \sigma\vec{E} = j\omega(\varepsilon' + j\varepsilon'')\vec{E} + \sigma\vec{E} = j\omega\left(\varepsilon' - j\varepsilon'' - j\frac{\sigma}{\omega}\right)\vec{E} \quad (13)$$

Outra característica de interesse é a relação entre a parte imaginária e real do fator em parênteses da Equação 13. Essa relação é adimensional e é denominada de tangente de perdas  $\tan \delta$ , dada nas Equações 14 e 15 (Pozar, 2012).

$$\tan \delta = \frac{\varepsilon'' + \frac{\sigma}{\omega}}{\varepsilon'} \quad (14)$$

$$\tan \delta = \frac{\omega\varepsilon'' + \sigma}{\omega\varepsilon'} \quad (15)$$

Os materiais possuem diferentes características dielétricas representadas por diversos valores para a constante dielétrica  $\epsilon_r$  e tangente de perdas  $\tan \delta$ . Tabela 2 traz alguns desses valores.

Tabela 2 – Propriedades dielétricas de alguns materiais.

Material	$\epsilon_r$	$\tan \delta$
Água destilada	80	0,04
Ar	1,0005	0,002
Óxido de alumínio	8,8	0,0006
Papel	3	0,008
Polipropileno	2,25	0,0003
Vidro	4 a 7	0,002

Fonte: Adaptado de Hayt Jr; Buck (2013).

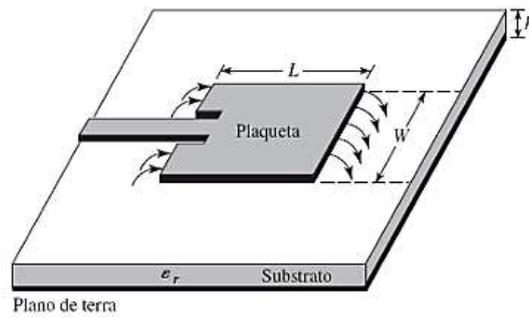
Alguns trabalhos buscam fornecer os valores dessas propriedades eletromagnéticas, realizando, assim, o que é denominado caracterização dielétrica, de uma diversidade de materiais, como, por exemplo, compósitos para aeronaves (Silva *et al.*, 2017), glicerol (Campos; Santos; Borges, 2019), de frutas como a *Mangifera indica L* (Silva Junior *et al.*, 2020) e outros, como grafite e grafeno (Pereira *et al.*, 2023). Outros trabalhos buscam associar essa caracterização a parâmetros de antenas que são utilizadas em conjunto a esses materiais, como as antenas de microfita.

### 2.3. ANTENAS DE MICROFITA E ELEMENTOS META-INSPIRADOS

As antenas de microfita se caracterizam por uma plaqueta metálica, denominada de *patch*, de espessura muito menor que o comprimento de onda  $\lambda$  da onda no espaço livre que tenha a frequência em que ela deve operar.

Este *patch* é posicionado a uma distância  $h$  entre 0,3% a 5% da medida do comprimento de onda  $\lambda$  acima do plano de terra. A plaqueta e o plano de terra são separados por um material dielétrico, chamado de substrato, com valores de constante dielétrica  $\epsilon_r$  característicos entre 2,2 e 12 (Balanis, 2009). A Figura 4 mostra uma configuração de antena de microfita com *patch* retangular e alimentada por uma linha de microfita.

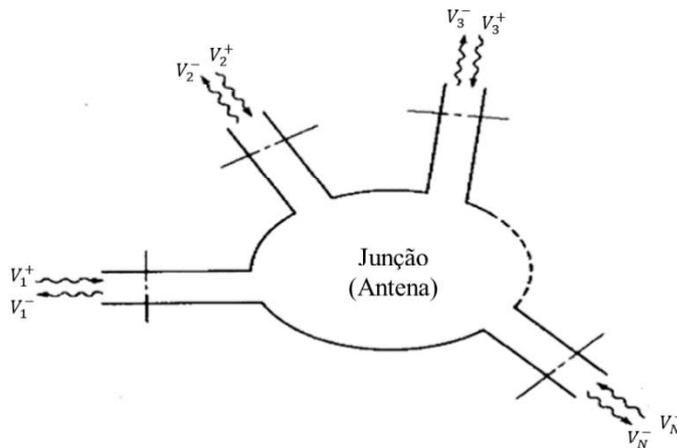
Figura 4 - Configuração de uma antena de microfita.



Fonte: Adaptado de Balanis (2009).

Uma antena como essa pode ser vista como uma rede de  $N$  portas com ondas de tensão incidentes e refletidas, respectivamente,  $V_N^+$  e  $V_N^-$ , podendo assim ser representada pelo diagrama na Figura 5.

Figura 5 - Diagrama de uma rede de  $N$  portas.



Fonte: Adaptado de Collin (1979).

A relação entre ondas incidentes e refletidas se dá por meio de uma matriz com parâmetros  $S_{ij}$  de espalhamento ou matriz de espalhamento (Collin, 1979). Os valores dessa matriz são determinados para cada antena e podem ser expressos de acordo com a Equação 16 (Pozar, 2012).

$$\begin{bmatrix} V_1^- \\ \dots \\ V_N^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & \dots & S_{1N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ S_{N1} & \dots & S_{NN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1^+ \\ \dots \\ V_N^+ \end{bmatrix} \quad (16)$$

Para o caso particular de duas portas, denominadas, por exemplo, de entrada e saída, a matriz de espalhamento se torna a mostrada na Equação 17.

$$\begin{bmatrix} V_1^- \\ V_2^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1^+ \\ V_2^+ \end{bmatrix} \quad (17)$$

No caso de haver onda incidente na porta 2 e não haver na porta 1, o parâmetro  $S_{12}$  é dado pela Equação 18 (Pozar, 2012).

$$S_{12} = \left. \frac{V_1^-}{V_2^+} \right|_{V_k^+ = 0, k \neq 2} \quad (18)$$

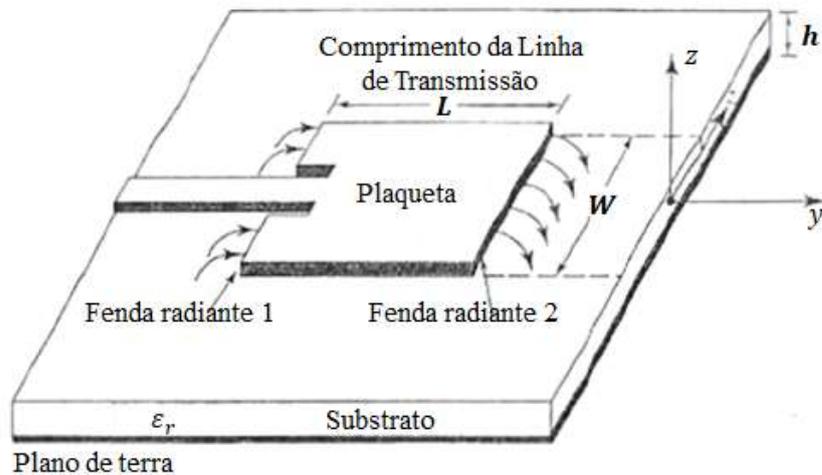
Isto é, ele relaciona, portanto, a onda refletida na porta 1 devido à onda incidente na porta 2. Nesse caso, ele é denominado coeficiente de transmissão da porta 2 para a 1. Os parâmetros  $S_{ii}$ , como  $S_{11}$  e  $S_{22}$ , são definidos como coeficientes de reflexão  $\Gamma$  na porta  $i$  caso todas as outras portas estiverem terminadas com cargas casadas, ou seja, quando não apresentam ondas refletidas. Para o caso particular de uma rede de uma porta apenas, o coeficiente de reflexão  $\Gamma$  sempre será igual ao parâmetro  $S_{11}$ . O coeficiente de reflexão se relaciona com a chamada perda de retorno ( $PR$ ), em decibéis, pela definição expressa na Equação 19 (Pozar, 2012).

$$PR = -20 \log \Gamma \quad (19)$$

Segundo Holanda (2016), a frequência de ressonância é o valor da frequência em que a perda de retorno apresenta seu menor valor, desde que abaixo de -10 dB.

Uma antena de microfita pode ser dimensionada com base em alguns modelos. Entre eles, o mais simples é o Método de Linha de Transmissão. Nele, a antena é representada como uma linha de transmissão de comprimento  $L$  e baixa impedância  $Z_C$  que se situa entre duas fendas radiantes com largura  $W$  e altura  $h$ , como mostra a Figura 6.

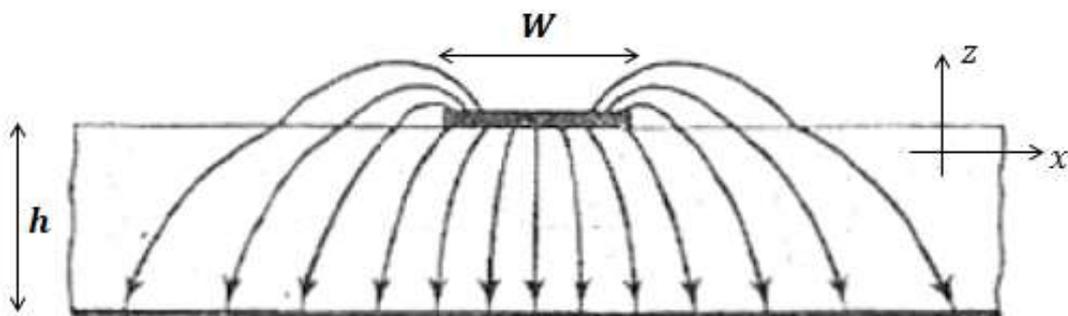
Figura 6 - Representação de uma antena de microfita pelo Modelo da Linha de Transmissão.



Fonte: Adaptado de Balanis (2009).

Devido a finitude das suas dimensões, as linhas dos campos sofrem o denominado efeito de franjamento nas bordas, que é dependente da razão entre o comprimento  $L$  e a espessura do substrato  $h$  e da constante dielétrica  $\epsilon_r$ . A consequência disso é que há um prolongamento das dimensões físicas, já que as linhas de campo passam também pelo ar e pelo substrato, como mostra a Figura 7.

Figura 7 - Efeito de franjamento em antenas de microfita.



Fonte: Adaptado de Balanis (2009).

Assim, a constante dielétrica também se altera para um certo valor, em que é denominada constante dielétrica efetiva  $\epsilon_{ref}$ , que seria a de uma antena ideal com

mesmas características mas que não sofreria do efeito de franjamento, que é calculada pela Equação 20 (Balanis, 2009).

$$\varepsilon_{ref} = \frac{\varepsilon_r + 1}{2} + \frac{\varepsilon_r - 1}{2} \left[ 1 + 12 \frac{h}{W} \right]^{-1/2} \quad (20)$$

A partir desse modelo e da consideração do efeito de franjamento, pode-se dimensionar a largura do *patch* através das Equações 21, sendo  $c$  a velocidade da luz no vácuo e  $f_r$  a frequência de ressonância da antena (Balanis, 2009).

$$W = \frac{c}{2f_r} \sqrt{\frac{2}{\varepsilon_r + 1}} \quad (21)$$

Para o comprimento efetivo da antena  $L_{ef}$ , considera-se que seu comprimento físico  $L$  é acrescido de duas vezes a variação do comprimento  $\Delta L$  resultante do efeito do franjamento nas fendas radiantes, como mostra a Equação 22 (Balanis, 2009).

$$L_{ef} = L + 2\Delta L \quad (22)$$

A Equação 23 é utilizada, então, para dimensionar o comprimento físico  $L$  da antena (Balanis, 2009).

$$L = \frac{c}{2f_r \sqrt{\varepsilon_{ref}}} - 2\Delta L \quad (23)$$

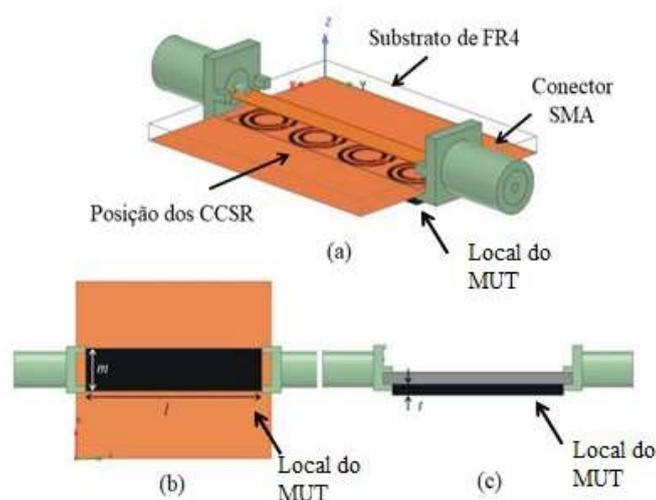
Assim, se observa que a constante dielétrica efetiva  $\varepsilon_{ref}$  e a frequência de ressonância da antena possuem uma relação inversamente proporcional. A partir disto, ao aproximar materiais com diferentes permissividades próximos a antenas, eles causam perturbações nos campos que atravessam estas últimas, alterando sua constante dielétrica efetiva. Como suas dimensões físicas não se alteram, a presença desses materiais provocam uma alteração na frequência de ressonância da antena. Com base nisso, pode-se determinar a permissividade do material, nesta situação denominado de MUT (do inglês *Material Under Test*), a partir do deslocamento na frequência ressonante que ele provoca.

Para diferenciar melhor materiais que provocam deslocamentos de frequência muito próximos, podem ser associadas a estruturas como os Ressonadores de Anel Fendido (*Split Ring Resonators – SRR – em inglês*), que são gravados no plano de terra, ou aos Ressonadores de Anel Fendido Complementar (*Complementary Split Ring Resonators – CSRR*), que são posicionados no *patch*. Ambos alteram mais a frequência de ressonância (Oliveira, 2021), ao aumentar o impacto da presença dos materiais sobre a constante dielétrica efetiva.

#### 2.4. SENSORIAMENTO COM ANTENAS DE MICROFITA E ELEMENTOS META-INSPIRADOS

Com base nesse princípio, estudos vêm sendo realizados para desenvolver sensores, como, por exemplo, para a caracterização de sólidos nos estudos de Haq *et al.* (2019) e de Oliveira *et al.* (2020). No caso do primeiro, foi utilizado um sensor com substrato de fibra de vidro (FR4) e quatro unidades de uma variação de SRR: Um Ressonador Espiral Circular Complementar (*Complementary Circular Spiral Resonator – CCSR – em inglês*). Esse sensor é mostrado destacando-se as suas duas portas e a posição dos CCSRs na Figura 8(a) e o local onde o MUT é posicionado, a visão do plano de terra na Figura 8(b) e a visão frontal do sensor na Figura 8(c).

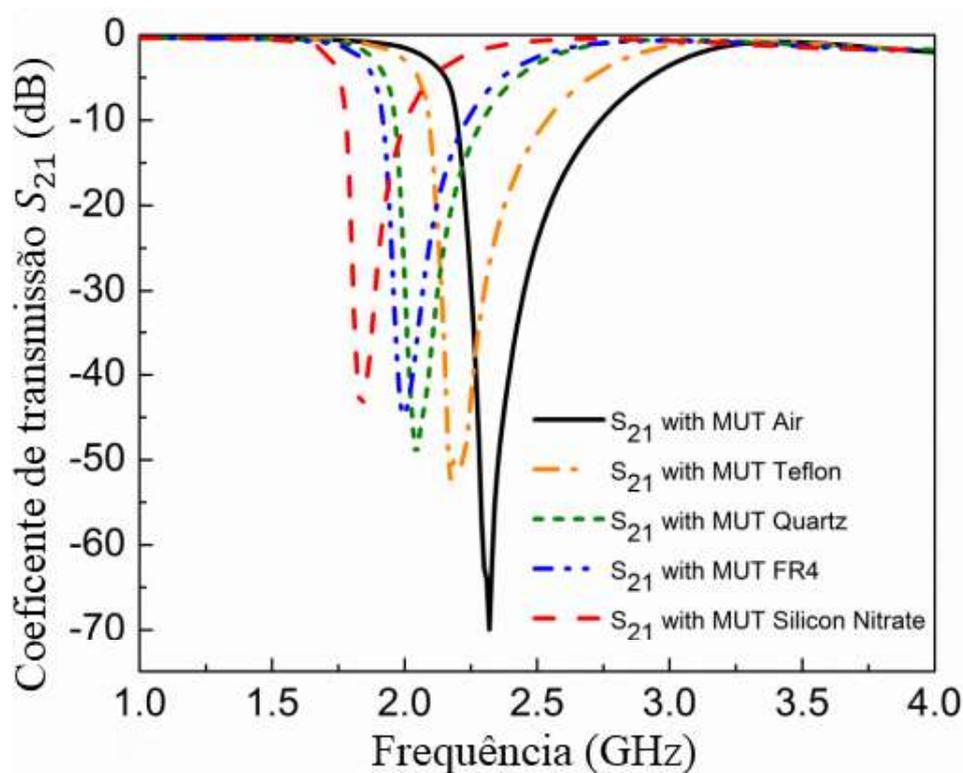
Figura 8 - Sensor proposto por Haq *et al.* (2019) em sua visão (a) em perspectiva, (b) a partir do plano de terra e (c) lateral.



Fonte: Adaptado de Haq *et al.* (2019)

Como MUTs foram utilizados os dielétricos teflon, quartzo, fibra de vidro (FR4) e o nitrato de silício, apresentando-se curvas de coeficiente de transmissão  $S_{21}$  com as frequências ressonantes deslocadas, como mostra a Figura 9.

Figura 9 - Curvas de coeficiente de transmissão para diferentes MUTs dielétricos obtidas por Haq *et al.* (2019).

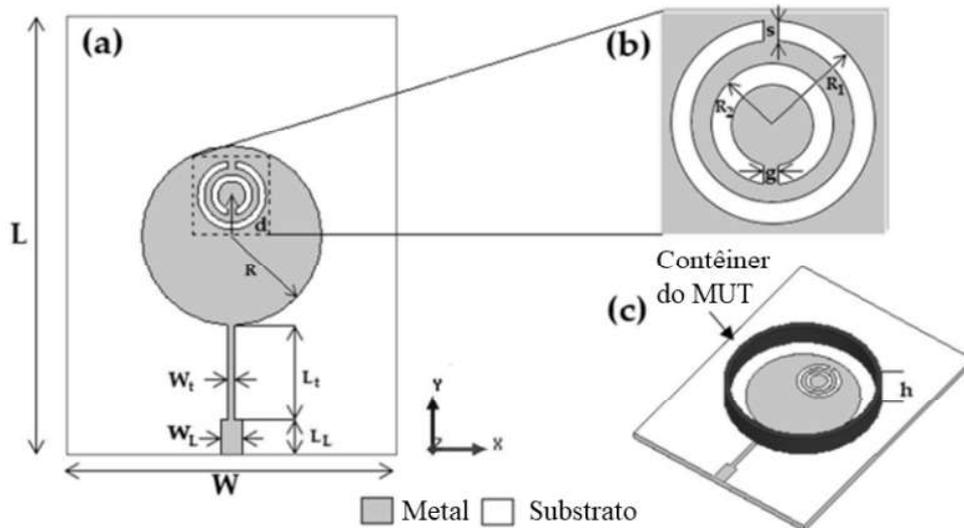


Fonte: Adaptado de Haq *et al.* (2019).

Foi observado que materiais com maiores constantes dielétricas provocavam diminuições maiores na frequência de ressonância. Os deslocamentos das frequências ressonantes foram, então, relacionados à constante dielétrica dos materiais, resultando em um modelo que determina essa propriedade do material a partir da medição obtida pelo sensor.

Já Oliveira *et al.* (2020) utiliza um CSRR posicionado sob um contêiner para comportar amostras de solo, tratando-se portanto de outro MUT sólido. Através da simulação do coeficiente de reflexão apresentado para MUTs com vários valores de constante dielétrica, obtém-se duas frequências de ressonância para cada. Através de interpolação, obtém-se um modelo que as relaciona com a constante dielétrica do material. A Figura 10 mostra a configuração utilizada para esse sensor.

Figura 10 - Sensor proposto por Oliveira *et al.* (2020).



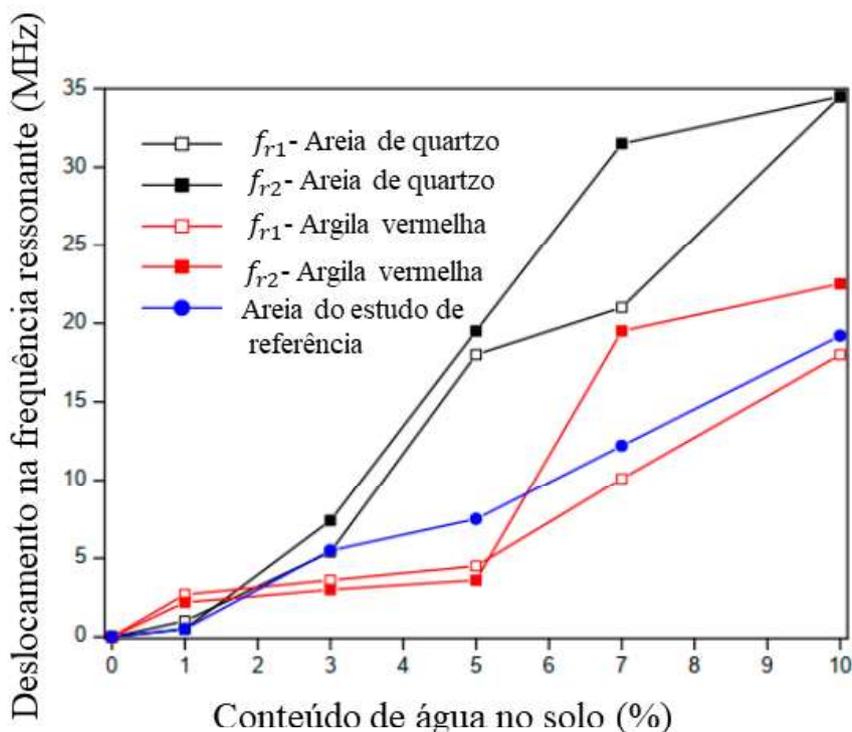
Fonte: Adaptado de Oliveira *et al.* (2020).

Através da simulação do coeficiente de reflexão apresentado para MUTs com vários valores de constante dielétrica, obtém-se duas frequências de ressonância para cada. Através de interpolação, obtém-se um modelo que as relaciona com a constante dielétrica do material. Para validação do modelo, o sensor é fabricado e o coeficiente de reflexão é medido para obter as frequências de ressonância quando se posicionam no local do MUT amostras de solo. Através do modelo, observa-se que o valor estimado é semelhante àquele mostrado na literatura para as amostras utilizadas.

Da mesma forma, utilizou-se com o MUT um mesmo tipo de solo mas com diferentes valores de umidade para caracterização, baseado no conteúdo de água no solo, em porcentagem. O resultado foi concordante com o encontrado em outros trabalhos.

Além disso, foi observado que as retas que ligam os dados obtidos para o deslocamento na frequência de ressonância ao aumentar-se o conteúdo de água neste estudo possuem inclinações superiores aos do outro trabalho. Isso significa que a sensibilidade obtida por esse sensor para a medição do conteúdo de água no solo é maior do que a do estudo de referência com o tipo de solo arenoso. A Figura 11 mostra esses deslocamentos de frequência para cada tipo de solo analisado em cada frequência de ressonância ( $f_{r1}$  e  $f_{r2}$ ) e a comparação com outro estudo que utilizou outro tipo de solo.

Figura 11 - Deslocamentos de frequência ressonante dos MUTs observados por Oliveira *et al.* (2020).



Fonte: Adaptado de Oliveira *et al.* (2020).

Outras pesquisas envolveram como MUTs misturas entre líquidos, como Withayachumnankul *et al.* (2013), Ebrahimi *et al.* (2014) e Kim, Yoo e Lim (2015) que investigaram diferentes porcentagens de volume de etanol diluído em água.

No caso dos dois primeiros, foram utilizados, respectivamente, um SRR e um CSRR para determinar as permissividades reais e imaginárias das misturas através dos deslocamentos de frequência de ressonância na curva do coeficiente de transmissão do sensor. Já Kim, Yoo e Lim (2015) utilizou uma variação de CSRR para relacionar diretamente a frequência de ressonância da curva do coeficiente de reflexão com a concentração de etanol na água.

Liu, Sun e Xu (2018) e Reyes-Vera *et al.* (2019) investigaram ainda, respectivamente, vários líquidos com diferentes constantes dielétricas e misturas de metanol e água em diferentes concentrações, obtendo modelos que relacionavam a frequência ressonante na curva do coeficiente de transmissão com a permissividade do material.

Todos esses estudos verificaram que o aumento da concentração da substância na água diminuía a constante dielétrica da mistura e provocava um aumento na frequência de ressonância.

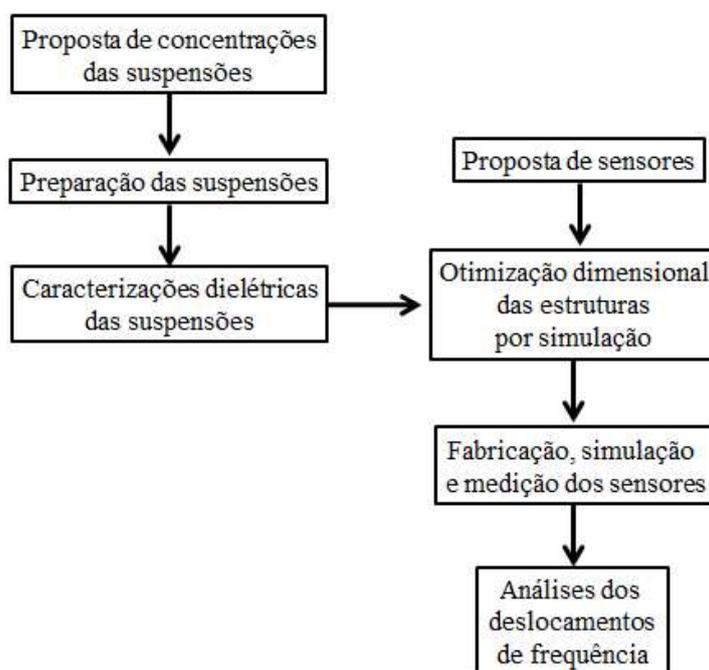
Zhang *et al.* (2019) apresenta um arranjo baseado em cinco CSRRs alimentados por uma linha de transmissão, que operaram em diferentes frequências – 1,36, 3,09, 5,00, 6,82 e 8,91 GHz – cobrindo uma larga faixa de frequências. Foram comparados MUTs com vários níveis de características, como diferentes valores de pH, de oxigênio dissolvido e de concentração de metais pesados. As cinco frequências de ressonância causadas pelos cinco ressonadores permitiram observar em qual faixa de frequências se observava o maior deslocamento de frequência.

Com base nesses estudos e percebendo a necessidade de estudos sobre a utilização de amostras de água com diferentes concentrações de cobre na água como MUTs, este estudo traz a seguir uma caracterização dielétrica desse material.

### 3. METODOLOGIA

A metodologia se dividiu em duas partes: foram concebidas as suspensões de cobre que serão utilizadas como MUT e em seguida foi proposto o sensor que as utilizarão, estudando-se o deslocamento da frequência de ressonância ao mudar-se de uma para outra sobre o sensor, como mostra o fluxograma mostrado na Figura 12.

Figura 12 - Fluxograma da metodologia utilizada.



Fonte: Autoria própria.

Assim, o processo de preparo e caracterização das suspensões de cobre fornece dados para que se possa a partir deles determinar os sensores que tenham os melhores desempenhos que as diferenciem.

#### 3.1. PREPARO E CARACTERIZAÇÃO DAS SUSPENSÕES DE COBRE

A proposta das concentrações das suspensões considerou os valores apresentados na Tabela 1 que estão na ordem de grandeza de algumas unidades de miligramas por litro. Para tornar viável a preparação, de forma a não exigir grandes volumes de água para isso, foram propostas as concentrações de 2 mg/L, 4 mg/L, 6

mg/L, 8 mg/L e 10 mg/L com o intuito de servir de MUT para os sensores propostos para detecção de cobre na água.

Para prepará-las, a partir de cobre metálico em pó com 99,6% de pureza, era pesado uma massa até se obter o valor adequado que, no volume de água destilada fixado, fossem obtidas as concentrações propostas. Essas suspensões preparadas foram armazenadas em béqueres. A água destilada utilizada na preparação também foi igualmente armazenada para ser utilizada como MUT de referência, sendo denominada de béquer com concentração de 0 mg/L.

Para evitar a decantação do pó, os béqueres com as concentrações superiores a 0 mg/L foram colocados sob agitação magnética por algumas horas. A Figura 13 mostra o equipamento utilizado para a agitação magnética.

Figura 13 - Agitação magnética para diluição de cobre nas suspensões.



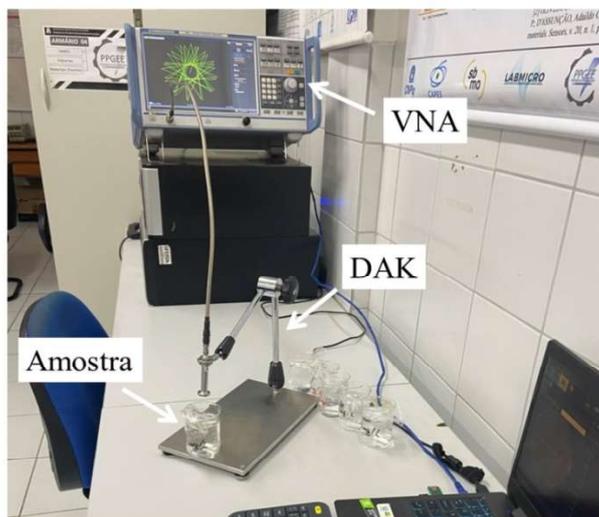
Fonte: Autoria própria.

Com um Analisador de Redes Vetoriais (*Vector Network Analyzer* – VNA), modelo ZND (100 kHz – 8,5 GHz) da Rohde & Schwarz, associado ao Kit de Medição Dielétrico (*Dielectric Assessment Kit* – DAK), modelo 3.5 SPEAG (200 MHz – 20 GHz), foram executadas as medidas da permissividade real  $\epsilon'$  e as tangentes dielétricas de perdas  $\tan \delta$  para realizar a caracterização dielétrica.

Como se almeja que os sensores propostos apresentem frequências de ressonância entre 1 GHz e 3 GHz para que tenham dimensões que viabilizem seu manuseio, a medição dessas variáveis ocorreu nessa faixa de frequências com um passo

de 50 MHz. A Figura 14 mostra a configuração utilizada para a caracterização desses materiais.

Figura 14 - Configuração utilizada para a caracterização dos materiais.



Fonte: Autoria própria.

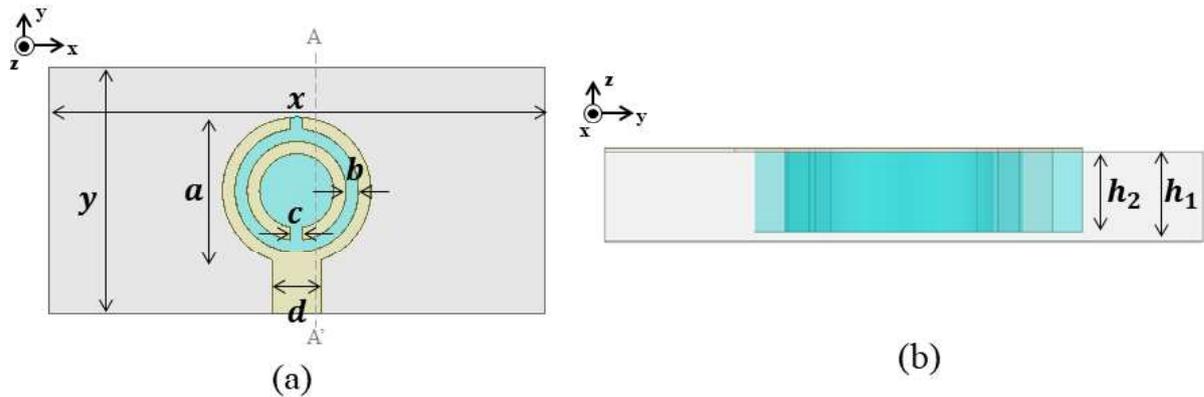
### 3.2. PROPOSTA DE SENSORES BASEADOS NO DESLOCAMENTO DE FREQUÊNCIA

Para chegar à versão do sensor proposta neste trabalho, foram tomadas como inspiração as configurações de sensores apresentadas por Ebrahimi *et al.* (2014), Oliveira *et al.* (2019) e Zhang *et al.* (2019). Em seguida, os dados obtidos na caracterização das suspensões foram inseridos no *software ANSYS® Electromagnetics Suite, Release 2019.2* permitindo a simulação do comportamento como MUT desses materiais em cada valor de frequência entre 1 GHz a 3 GHz. Pela sua disponibilidade no laboratório, nas simulações foi considerado que o substrato é de poliácido láctico (PLA).

Baseados nos trabalhos, simulou-se o coeficiente de reflexão desses sensores utilizando-se as diferentes suspensões caracterizadas como MUT, bem como os mesmos com alterações nos métodos de alimentação, nas topologias e dimensões. Foram descartadas as configurações que possuíam frequências de ressonância muito altas, devido aos limites de frequência em que os equipamentos do laboratório poderiam medir e aquelas que possuíam dimensões pequenas que tornavam o processo de sua fabricação e medição mais difíceis. O sensor destacado entre aqueles não descartados

possui um CSRR como *patch*. No interior dos anéis do CSRR, o MUT preenche uma lacuna. A Figura 15 mostra a configuração proposta e a indicação das dimensões utilizadas e os valores dessas dimensões otimizadas são mostrados na Tabela 3.

Figura 15 - Geometria proposta para o sensor com CSRR circular (a) na vista superior e (b) no Corte AA'.



Fonte: Autoria própria.

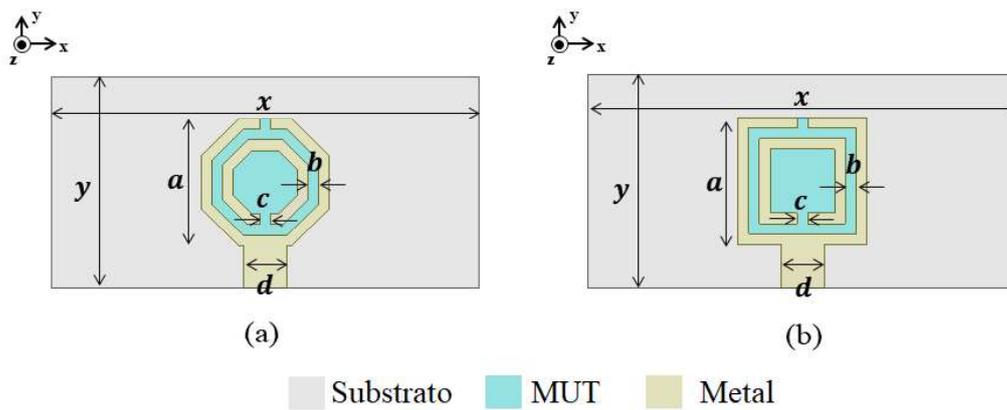
Tabela 3 – Dimensões otimizadas do sensor com CSRR circular para maiores deslocamentos de frequência de ressonância.

Dimensão	Medida (mm)	Dimensão	Medida (mm)
$a$	24,0	$x$	80,0
$b$	2,0	$y$	40,0
$c$	2,0	$h_1$	6,0
$d$	8,0	$h_2$	5,6

Fonte: Autoria própria.

Com o objetivo de investigar o desempenho de diferentes geometrias do CSRR, foram propostos o mesmo também em formato octogonal e quadrado. A fim de obter melhor semelhança geométrica, utilizou-se os mesmos valores de dimensão da Tabela 3 adaptadas às novas geometrias, como mostra a Figura 16.

Figura 16 - Geometria proposta para os sensores com CSRR octogonal e quadrado.

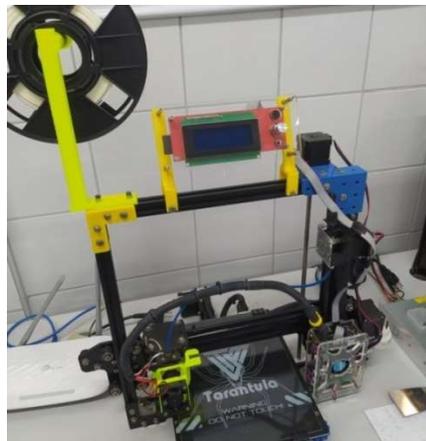


Fonte: Autoria própria.

Apesar da igualdade das dimensões, a diferença do formato gerou distinção das áreas reservadas para o MUT em cada sensor. Tais áreas em cada formato foram de, aproximadamente,  $234 \text{ mm}^2$ ,  $265 \text{ mm}^2$  e  $296 \text{ mm}^2$ , gerando volumes de MUT em cada sensor de aproximadamente  $1,31 \text{ mL}$ ,  $1,48 \text{ mL}$  e  $1,66 \text{ mL}$  para, respectivamente, os formatos circular, octogonal e quadrado.

Para a fabricação desses sensores, foi utilizado o *software Autodesk® Fusion 360* para o desenho tridimensional do substrato de PLA e o fatiamento para sua impressão no *software Ultimaker Cura*. As peças de PLA foram, então, impressas com auxílio da impressora 3D, modelo Tevo Tarantula, mostrada na Figura 17.

Figura 17 - Impressora 3D, modelo Tevo Tarantula utilizada para confecção do substrato de PLA.



Fonte: Autoria própria.

Foram impressas peças com relevos de 0,2 mm sobre os substratos nos formatos dos CSRR circular, octogonal e quadrado para facilitar o posicionamento da fita de cobre e seu posterior corte na geometria e dimensões propostas. Também foi posicionada uma fita de cobre sob as peças de PLA com o fim de obter o plano de terra dos sensores. Para cada formato, foram confeccionados três protótipos que receberam uma numeração de 1 a 3, que podem ser visualizados na Figura 18 com suas dimensões demonstradas pelo paquímetro. Os protótipos foram denominados de C1, C2, C3, O1, O2, O3, Q1, Q2 e Q3, indicando a inicial a geometria (C – Circular, O – Octogonal, Q – Quadrado).

Figura 18 - Protótipos dos sensores fabricados.



Fonte: Autoria própria.

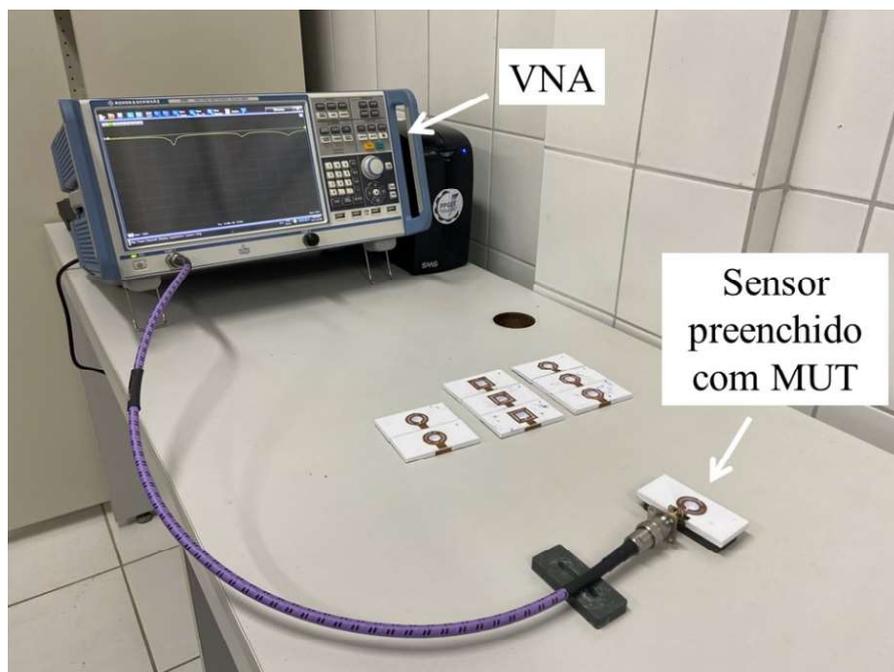
Para enriquecer a simulação desses sensores, diferenciando cada protótipo de mesmo formato, os substratos de PLA de cada protótipo fabricado foram caracterizados, a partir da medida da permissividade real  $\epsilon'$  com auxílio do VNA.

A simulação investigou a faixa de 1 GHz a 3 GHz, com um passo de 8,3 MHz. Foram então observadas as frequências de ressonância apresentadas nas situações em que o MUT estava vazio e preenchido com as suspensões nas concentrações de 0 mg/L, 2 mg/L, 4 mg/L, 6 mg/L, 8 mg/L e 10 mg/L, denominadas de, respectivamente,  $f_{V-sim}$ ,  $f_{0-sim}$ ,  $f_{2-sim}$ ,  $f_{4-sim}$ ,  $f_{6-sim}$ ,  $f_{8-sim}$  e  $f_{10-sim}$ .

Com auxílio da associação do VNA com o DAK, foi então medido o coeficiente de reflexão  $S_{11}$  para cada protótipo e identificadas as frequências de ressonância nas situações em que o local do MUT estava vazio e em que ele estava preenchido com as suspensões com concentrações de 0 mg/L, 2 mg/L, 4 mg/L, 6 mg/L, 8 mg/L e 10 mg/L, denominadas de, respectivamente,  $f_V$ ,  $f_0$ ,  $f_2$ ,  $f_4$ ,  $f_6$ ,  $f_8$  e  $f_{10}$ . Tais valores registrados foram as médias de três medições realizadas em cada um dos nove protótipos. Para o preenchimento do sensor com o MUT foi entornado o conteúdo dos béqueres na lacuna de cada protótipo, sendo os eventuais excessos enxugados com papel.

As medições do coeficiente de reflexão foram realizadas na faixa de 1 GHz a 3 GHz, com um passo de 4,79 MHz. A configuração utilizada para a medição do coeficiente de reflexão é mostrada na Figura 19.

Figura 19 - Configuração utilizada para a medição do coeficiente de reflexão dos protótipos.



Fonte: Autoria própria.

O deslocamento da frequência de ressonância foi obtido, então, fazendo-se a diferença entre os valores apresentados pelas suspensões com cada concentração de cobre  $f_{i-sim}$ , em que  $i$  é a concentração em mg/L, e aqueles apresentados pela água destilada ( $\Delta f_{0-i-sim}$ ) e quando o local do MUT estava vazio ( $\Delta f_{V-i-sim}$ ), como mostram as Equações 24 e 25.

$$\Delta f_{0-i-sim} = f_{i-sim} - f_{0-sim} \quad (24)$$

$$\Delta f_{V-i-sim} = f_{i-sim} - f_{V-sim} \quad (25)$$

Analogamente, foi feito com os valores obtidos nas médias das medições, através das Equações 26 e 27.

$$\Delta f_{0-i} = f_i - f_0 \quad (26)$$

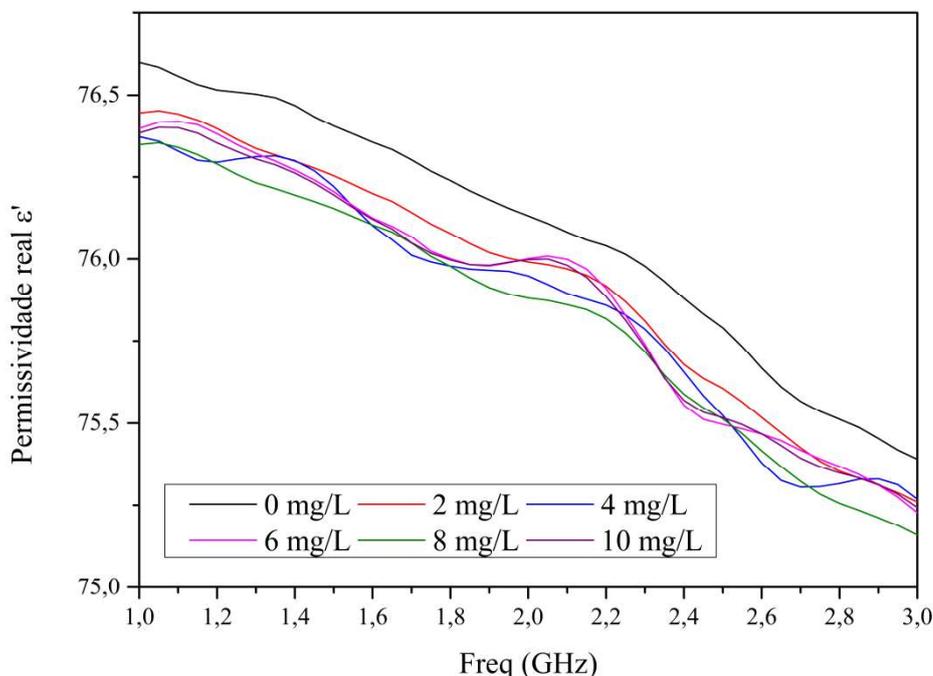
$$\Delta f_{V-i} = f_i - f_V \quad (27)$$

A partir desses dados, foi feita uma análise a fim de correlacionar os deslocamentos de frequência de ressonância com a concentração  $i$  da suspensão.

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Figura 20 mostra a permissividade real  $\epsilon'$  apresentada por cada uma das suspensões na faixa de 1 GHz a 3 GHz.

Figura 20 - Permissividade real  $\epsilon'$  das suspensões.



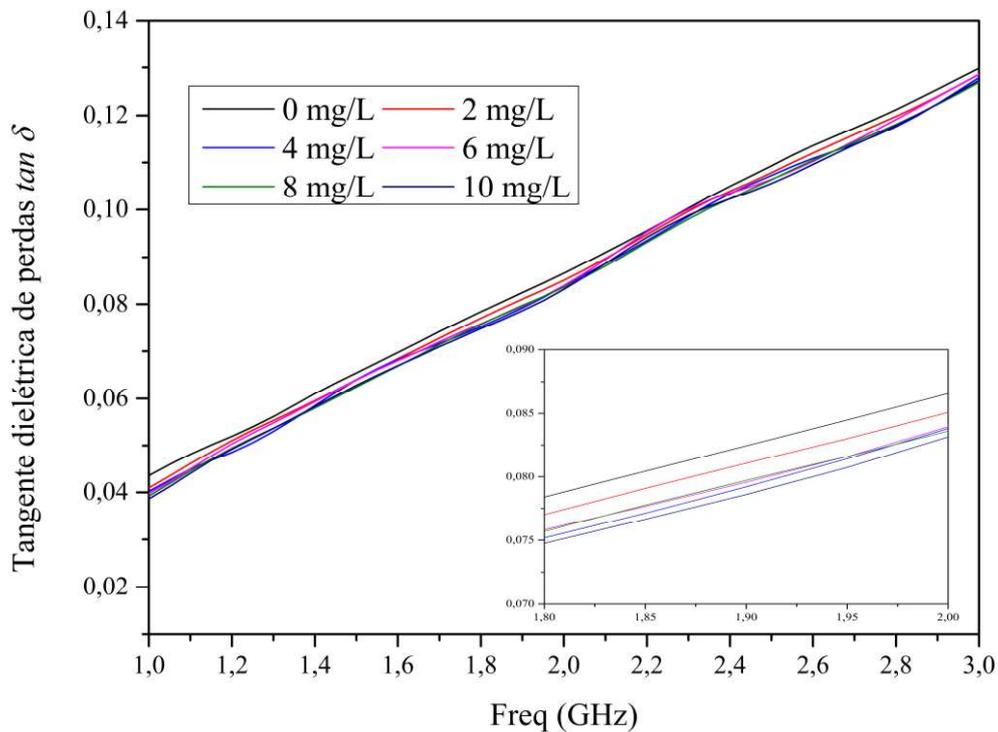
Fonte: Autoria própria.

Pode-se observar que as curvas são separadas, principalmente para aquelas das concentrações de 0 mg/L e 2 mg/L, embora em certas faixas algumas curvas se sobreponham. Esse resultado está de acordo com os valores de permissividade da literatura, que indicam que a permissividade real da água é superior a do cobre. Assim, uma maior presença deste último diminui o valor apresentado pela permissividade da suspensão.

Essa diferença de permissividade entre as suspensões é importante, porque permite que haja uma diversidade de perturbação das características do sensor de forma mais acentuada quando elas são posicionadas cada uma junto a ele, alterando-se a frequência de ressonância devido ao efeito de franjamento.

A Figura 21 mostra a tangente dielétrica de perdas das soluções com diferentes concentrações na faixa de 1 GHz a 3 GHz, com destaque para a região entre 1,8 GHz e 2 GHz para melhor visualização.

Figura 21 - Tangente dielétrica de perdas  $\tan \delta$  das suspensões.

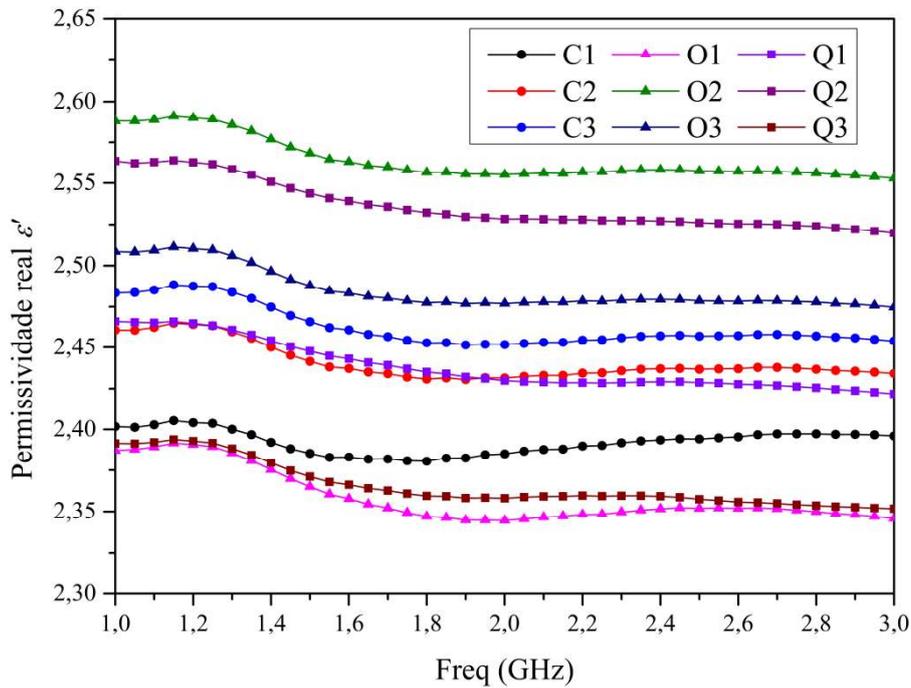


Fonte: Autoria própria.

Nesse caso, a tangente dielétrica indica as perdas provocadas pelo meio material na onda incidente. Como as curvas se mostraram mais próximas, as perdas que são percebidas são muito próximas. Apesar disso, observa-se novamente a separação entre as curvas, indicando diferenças entre os MUTs utilizados, mesmo que a diferença de concentração entre as suspensões seja de 2 mg/L. Percebe-se também maior separação entre as curvas nas faixas de aproximadamente, 1,0 GHz a 1,4 GHz, 1,8 GHz a 2,1 GHz e 2,6 GHz a 2,8 GHz.

Os substratos dos protótipos fabricados têm suas permissividades medidas mostradas na Figura 22.

Figura 22 - Permissividade real  $\epsilon'$  dos substratos dos protótipos.



Fonte: Autoria própria.

Em toda a faixa de frequência, os valores mínimo e máximo entre os apresentados foram de 2,3446 e 2,5910, indicando similaridade entre os protótipos. A média de todos os valores medidos 2,4493 entre 1 GHz e 3 GHz, posicionando o PLA como um dielétrico, segundo os valores apresentados por Balanis (2009). Entre os protótipos de mesmo formato, as médias foram de 2,4318, 2,4694 e 2,4467 para, respectivamente, os circulares, octogonais e quadrados. O desvio padrão foi menor nos circulares e maior nos octogonais, indicando que protótipos deste último formato tendem a apresentar respostas mais divergentes.

No Apêndice A, são mostrados os gráficos da simulação e das três medições do coeficiente de reflexão de cada um dos nove protótipos, com a faixa de 1 GHz a 4 GHz reduzida para uma menor para facilitar a visualização. A mudança do limite superior da faixa de frequência em relação à utilizada nas caracterizações foi necessária pela ocorrência dos valores  $f_{V-sim}$  e  $f_V$  terem superado 3 GHz. Desses gráficos foram extraídos os valores simulados da frequência de ressonância, em GHz, reunidos na Tabela 4.

Tabela 4 – Frequência de ressonância do coeficiente de reflexão dos simulado dos protótipos

<b>Protótipo</b>	$f_{0-sim}$	$f_{2-sim}$	$f_{4-sim}$	$f_{6-sim}$	$f_{8-sim}$	$f_{10-sim}$	$f_{V-sim}$
C1	1,987	2,016	2,035	2,054	2,102	2,112	3,376
C2	2,097	2,112	2,117	2,126	2,136	2,145	3,367
C3	1,911	1,954	1,991	2,006	2,021	2,049	3,362
O1	2,629	2,643	2,658	2,672	2,687	2,701	3,079
O2	2,576	2,696	2,610	2,619	2,634	2,648	3,007
O3	2,677	2,687	2,691	2,696	2,715	2,734	3,031
Q1	1,345	1,365	1,379	1,384	1,403	1,417	2,102
Q2	1,417	1,422	1,427	1,436	1,441	1,441	2,088
Q3	1,398	1,412	1,417	1,422	1,432	1,441	2,107

Fonte: Autoria própria.

Percebe-se uma tendência crescente na frequência de ressonância ao se observar o aumento da concentração da solução, tendo  $f_{V-sim}$  sempre apresentado os maiores e mais distanciados valores em relação aos outros, verificando-se a correlação entre permissividade e frequência de ressonância, devido ao fato da situação do MUT estar vazio implicar de que eles está preenchido com o ar, cuja permissividade é próxima a unitária, divergindo consideravelmente em relação ao valor apresentado pela água mostrado na Tabela 2.

Desconsiderando-se esses valores mais distanciados de  $f_{V-sim}$ , protótipos circulares, octogonais e quadrados apresentaram frequências de ressonância na simulação nas faixas de, respectivamente, 1,911 GHz e 2,145 GHz, 2,576 GHz e 2,734 GHz e entre 1,345 GHz e 1,441 GHz. Entre os mesmos protótipos, a ordem decrescente das médias dos valores foram os dos protótipos C2, C1 e C3 nos circulares, O3, O1 e O2 nos octogonais e Q2, Q3 e Q1 nos quadrados.

A variação média entre a frequência de ressonância apresentada por entre suspensões com concentrações consecutivas foi maior entre as concentrações de 0 mg/L e 2 mg/L (1%), apresentando os sensores uma maior sensibilidade nessa faixa de concentrações.

A Tabela 5 mostra a média do conjunto de três medições da frequência de ressonância, em GHz, na curva do coeficiente de reflexão de cada um dos nove protótipos.

Tabela 5 – Frequência de ressonância média das medições do coeficiente de reflexão dos protótipos

<b>Protótipo</b>	$f_0$	$f_2$	$f_4$	$f_6$	$f_8$	$f_{10}$	$f_V$
C1	1,840	1,896	1,931	1,978	2,018	2,081	3,660
C2	1,792	1,879	1,917	2,046	2,069	2,147	3,836
C3	1,646	1,748	1,856	1,962	2,033	2,075	3,788
O1	2,522	2,556	2,581	2,647	2,679	2,720	3,557
O2	2,559	2,597	2,623	2,650	2,671	2,714	3,624
O3	2,516	2,536	2,560	2,605	2,618	2,645	3,568
Q1	1,235	1,245	1,258	1,278	1,296	1,310	1,725
Q2	1,213	1,227	1,246	1,267	1,291	1,320	1,677
Q3	1,240	1,254	1,264	1,280	1,296	1,313	1,759

Fonte: Autoria própria.

As três medidas de cada frequência de ressonância tiveram um desvio padrão máximo em relação a média de 9%, 4% e 4% para os protótipos circulares, octogonais e quadrados, respectivamente, mostrando maior representatividade dos valores médios da tabela para os dois últimos formatos. Em relação aos valores que serão utilizados como referência no cálculo de deslocamento de frequência,  $f_0$  apresentou uma dispersão

representada pelo desvio padrão médio em relação à média de 2,71%, 2,05% e 1,45% nos protótipos circulares, octogonais e quadrados. Em relação ao valor  $f_V$ , esses números foram de 2,28%, 1,97% e 1,79%. Dessa forma, as médias de  $f_0$  e  $f_V$  apresentam em geral representatividade próximas em relação ao conjunto de valores que representam, embora  $f_V$  seja melhor nos protótipos circulares e octogonais e  $f_0$  nos quadrados.

A tendência de aumento da frequência de ressonância com a diminuição da permissividade foi também verificada nas medições, com  $f_V$  mostrando-se o maior e mais distante valor. A faixa de frequência entre protótipos de mesmo formato, excetuando os valores de  $f_V$ , foi de 1,646 GHz a 2,147 GHz, 2,516 GHz e 2,720 GHz e 1,213 GHz e 1,320 GHz para, respectivamente, os circulares, octogonais e quadrados. Quando comparados aos valores apresentados na simulação, as menores frequências de ressonância medida apresentaram quedas de 13,87%, 2,33% e 9,81% e os maiores, quedas de 0,09%, 0,51% e 8,40% para os protótipos circular, octogonal e quadrado, mostrando a similaridade entre medição e simulação.

Tais diferenças podem ser atribuídas a alguns erros experimentais. A simulação, por exemplo, considerou os substratos apenas em relação às suas permissividades. Além disso, ao se entornar o MUT no sensor de forma imprecisa para preenchê-lo com MUT pode ter sido causado uma disposição do líquido de forma desigual entre os sensores, como, por exemplo, no volume colocado e na maior ou menor presença dos excessos no substrato e no *patch* não enxugados corretamente. Assim, a água excedente disposta no *patch* faz com que as linhas de campo atravessem um volume de água, que possui uma permissividade muito maior, que não está presente na simulação. Isso afeta diretamente a constante dielétrica efetiva, causando maiores desvios na frequência de ressonância.

A variação na frequência de ressonância em relação à concentração anterior foi maior entre os valores de 4 mg/L e 6 mg/L, apresentando maior sensibilidade nessa faixa de frequências. A faixa entre 0 mg/L e 2 mg/L, que apresentou maior sensibilidade na simulação, apresentou a segunda maior sensibilidade, com uma variação média de 2,3% em todos os protótipos, mostrando coerência com a sensibilidade apresentada na simulação nesta faixa. Também mostrou-se consonante com as medições da permissividade e tangente dielétrica de perdas mostrados nas Figuras 20 e 21, em que as

curvas nessas concentrações apresentam-se mais distanciadas nas frequências em que se situaram as frequências de ressonâncias dos sensores.

Segundo as Equações 24 e 25, foram obtidos os deslocamentos de frequência de ressonância  $\Delta f_{0-i-sim}$  e  $\Delta f_{V-i-sim}$  na simulação para cada concentração  $i$ , reunidos na Tabela 6.

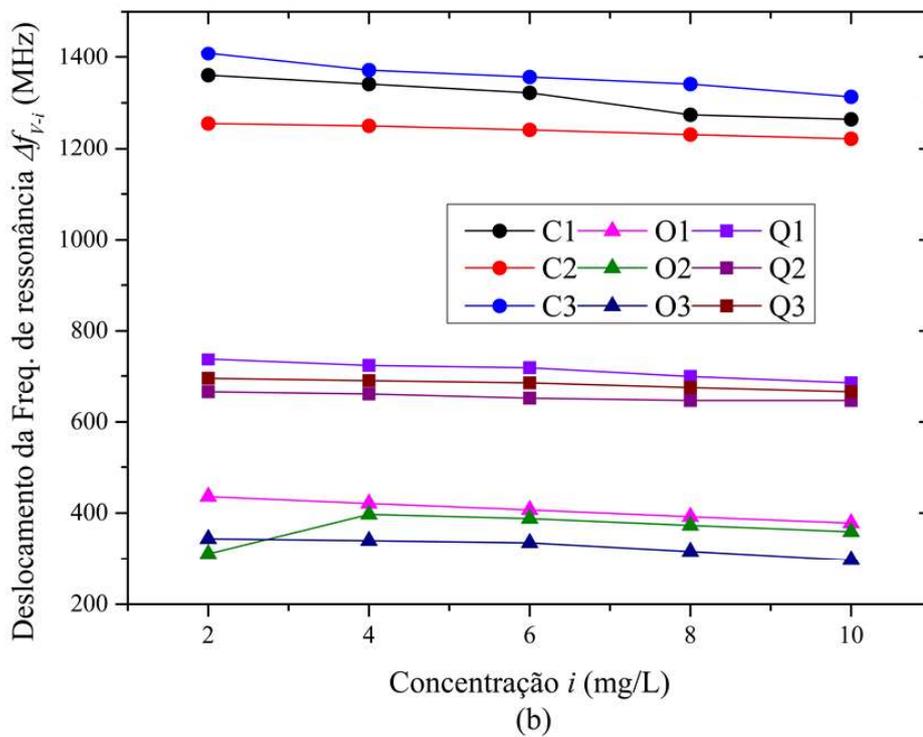
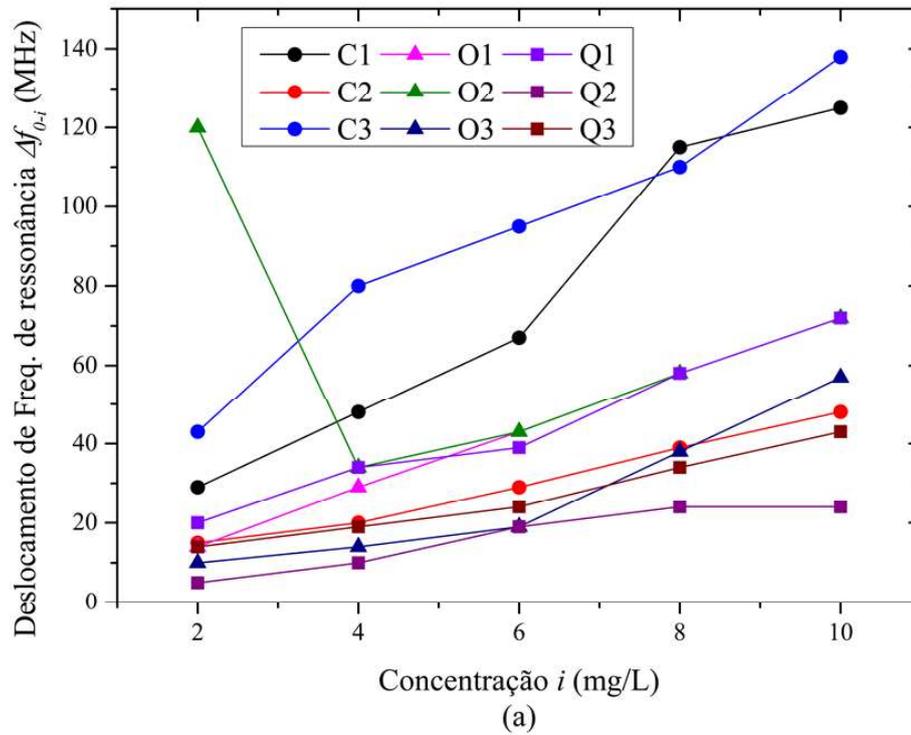
Tabela 6 – Deslocamentos de frequência obtidos em cada protótipo na simulação

Protótipo	$\Delta f_{0-i}$					$\Delta f_{V-i}$				
	2	4	6	8	10	2	4	6	8	10
C1	29	48	67	115	125	-1360	-1341	-1322	-1274	-1264
C2	15	20	29	39	48	-1255	-1250	-1241	-1231	-1222
C3	43	80	95	110	138	-1408	-1371	-1356	-1341	-1313
O1	14	29	43	58	72	-436	-421	-407	-392	-378
O2	120	34	43	58	72	-311	-397	-388	-373	-359
O3	10	14	19	38	57	-344	-340	-335	-316	-297
Q1	20	34	39	58	72	-737	-723	-718	-699	-685
Q2	5	10	19	24	24	-666	-661	-652	-647	-647
Q3	14	19	24	34	43	-695	-690	-685	-675	-666

Fonte: Autoria própria.

Tais dados podem ser observados graficamente nas Figuras 23(a) e 23(b).

Figura 23 - Deslocamentos de frequência de ressonância a partir dos valores simulados em relação à (a)  $f_0$  e a (b)  $f_V$



Fonte: Autoria própria

Em ambos os gráficos, é observado que o protótipo C1 apresenta a maior variação na frequência de ressonância entre as concentrações 4 mg/L e 6 mg/L (0,9%) e entre 6 mg/L e 8 mg/L (2,3%). Já o protótipo C3 apresenta o maior valor de deslocamento entre as concentrações 0 mg/L e 2 mg/L (2,3%), 2 mg/L e 4 mg/L (2,0%) e entre 8 mg/L e 10 mg/L (1,4%) entre todos os protótipos. Com os dados da Tabela 7 e as Equações 26 e 27, se obtém os deslocamentos de frequência de ressonância  $\Delta f_{0-i}$  e  $\Delta f_{V-i}$  nas medições, reunidos na Tabela 7.

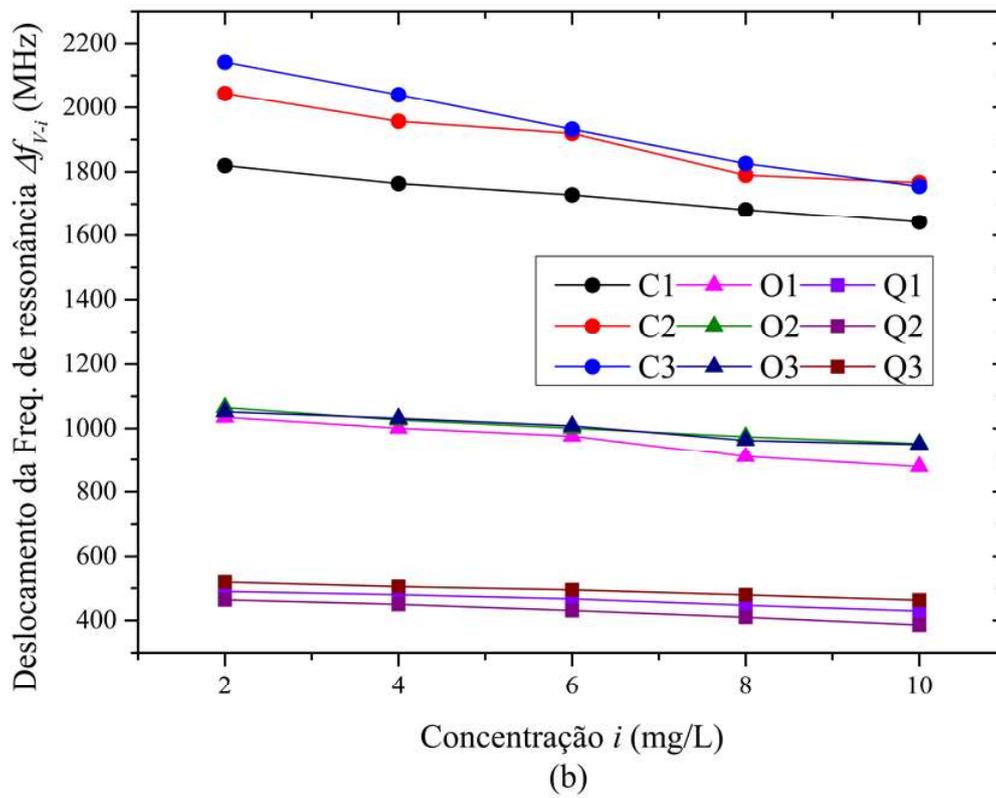
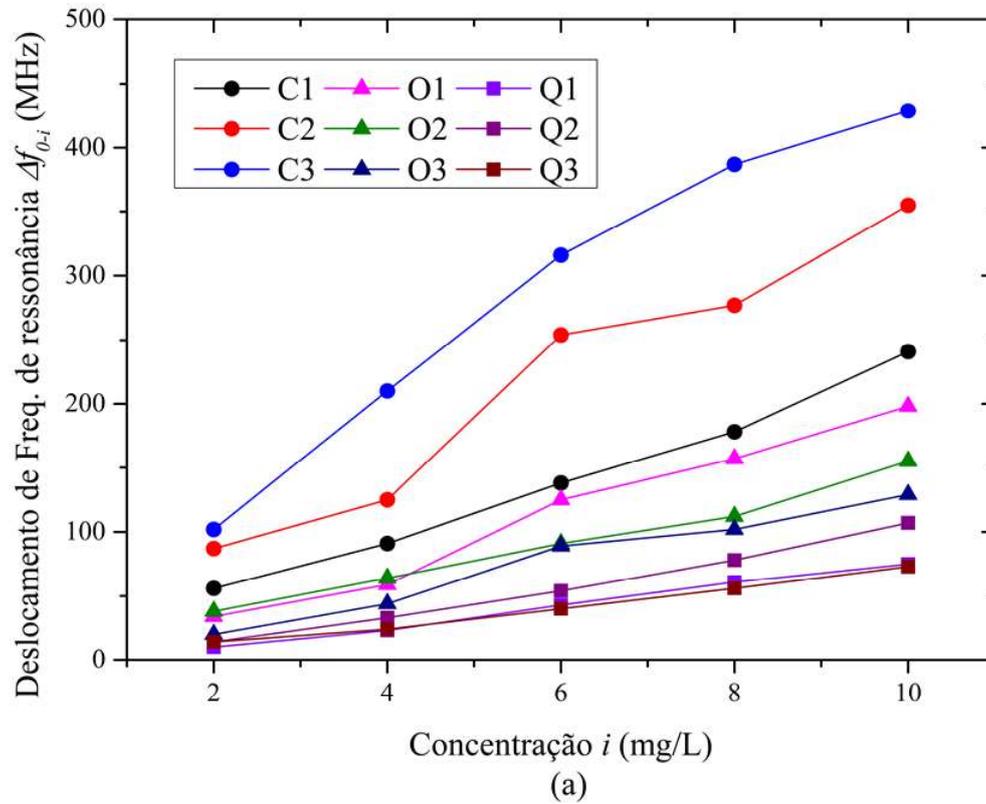
Tabela 7 – Deslocamentos de frequência obtidos em cada protótipo para os valores médios obtidos na medição

Protótipo	$\Delta f_{0-i}$					$\Delta f_{V-i}$				
	2	4	6	8	10	2	4	6	8	10
C1	56	91	138	178	241	-1820	-1764	-1729	-1682	-1642
C2	87	125	254	277	355	-2044	-1957	-1919	-1790	-1767
C3	102	210	316	387	429	-2142	-2040	-1932	-1826	-1755
O1	34	59	125	157	198	-1035	-1001	-976	-910	-878
O2	38	64	91	112	155	-1065	-1027	-1001	-974	-953
O3	20	44	89	102	129	-1052	-1032	-1008	-963	-950
Q1	10	23	43	61	75	-490	-480	-467	-447	-429
Q2	14	33	54	78	107	-464	-450	-431	-410	-386
Q3	14	24	40	56	73	-519	-505	-495	-479	-463

Fonte: Autoria própria.

Tais dados podem ser observados graficamente nas Figuras 24(a) e 24(b).

Figura 24 - Deslocamentos de frequência de ressonância a partir das médias dos valores medidos em relação à (a)  $f_0$  e a (b)  $f_V$



O protótipo C2 apresentou as maiores variações entre as concentrações 4 mg/L e 6 mg/L (6,7%) e entre 8 mg/L e 10 mg/L (3,8%). Já o protótipo C1 apresentou as maiores variações entre as concentrações 0 mg/L e 2 mg/L (6,2%), 2 mg/L e 4 mg/L (6,2%) e entre 6 mg/L e 8 mg/L (3,7%) entre todos os protótipos.

Para visualizar a sensibilidade geral verificada pelas medições dos protótipos, foi realizada a regressão linear dos dados obtidos na Tabela 7, com as variáveis  $\Delta f_{0-i}$  e  $\Delta f_{V-i}$  e a concentração  $i$ , em que o coeficiente angular representa a variação do deslocamento de frequência com a concentração e o coeficiente linear representa a interceptação da reta ajustada aos dados com o eixo da variável dependente.

A Tabela 8 mostra as equações das retas ajustada de  $\Delta f_{0-i}$  e  $\Delta f_{V-i}$ , em MHz, em função da concentração  $i$ , em mg/L, junto ao valor de  $R^2$ , adimensional, que representa, quanto mais próximo de 1, quão próxima é a reta em relação aos dados obtidos na simulação.

Tabela 8 – Equações das retas ajustadas aos dados de  $\Delta f_{0-i}$  e  $\Delta f_{V-i}$

Protótipo	$\Delta f_{0-i}$ vs. $i$	$\Delta f_{V-i}$ vs. $i$
C1	$22,83i + 3,52, R^2 = 0,989$	$22,83i - 1816, R^2 = 0,989$
C2	$34,41i + 12,61, R^2 = 0,959$	$34,41i - 2031, R^2 = 0,959$
C3	$41,59i + 39,75, R^2 = 0,971$	$41,59i - 2103, R^2 = 0,971$
O1	$21,32i - 13,57, R^2 = 0,984$	$21,32i - 1048, R^2 = 0,984$
O2	$14,05i + 7,66, R^2 = 0,985$	$14,05i - 1057, R^2 = 0,985$
O3	$13,73i - 5,11, R^2 = 0,975$	$13,73i - 1057, R^2 = 0,975$
Q1	$8,46i - 8,62, R^2 = 0,995$	$8,46i - 499, R^2 = 0,995$
Q2	$11,50i - 11,50, R^2 = 0,993$	$11,50i - 476, R^2 = 0,993$
Q3	$7,50i - 3,51, R^2 = 0,991$	$7,50i - 522, R^2 = 0,991$

Fonte: Autoria própria.

Observa-se os maiores coeficientes angulares nos protótipos circulares e os maiores valores de  $R^2$  nos quadrados. Percebe-se também a igualdade nos coeficientes angulares dos parâmetros  $\Delta f_{0-i}$  e  $\Delta f_{V-i}$ , já que a diferença entre eles é apenas o valor de referência que é subtraído, afetando-se apenas o coeficiente linear. Como concluiu-se anteriormente, os dois modelos são igualmente confiáveis entre si, já que o desvio padrão das três medições de  $f_0$  e  $f_V$  foram próximos.

Sobre esses modelos lineares, observa-se que os protótipos circulares apresentaram a menor média de  $R^2$  (0,973), indicando uma reta ajustada menos aproximada aos dados obtidos e, portanto, menos confiável. Em relação a esse parâmetro, os quadrados apresentaram a melhor média (0,993), e os octogonais um valor intermediário entre os dois formatos (0,982).

A explicação pode ser apontada pelo uso de um maior volume de MUT nos protótipos quadrados, octogonais e circulares, em ordem decrescente, indicando que maiores volumes geram menos distorções entre as medições e um modelo linear mais ajustado.

Em relação a suas inclinações, percebe-se a superioridade do coeficiente angular nos protótipos circulares, com uma média de 32,94 MHz/mg/L, seguido das médias dos protótipos octogonais (16,37 MHz/mg/L) e quadrados (9,15 MHz/mg/L).

Entre os protótipos de mesmo formato, observa-se que C1, O2 e Q1 apresentaram os maiores valores de  $R^2$ , sendo o do quadrado superior aos demais, enquanto C3, O1 e Q2 apresentaram os maiores valores de inclinação de reta ajustada, tendo o circular o maior deles. Nenhum protótipo, portanto, destacou-se simultaneamente em confiabilidade e sensibilidade.

Como o passo da medição foi de 4,79 MHz, pode-se afirmar que os protótipos circulares, octogonais e quadrados conseguem detectar uma mudança de, respectivamente, 0,145 mg/L, 0,293 mg/L e 0,523 mg/L, ou 145  $\mu$ g/L, 293  $\mu$ g/L e 523  $\mu$ g/L de cobre na solução. A Tabela 9 mostra esse valor especificado, em mg/L, para cada um dos protótipos.

Tabela 9 – Mudança de concentração de cobre na água detectável por cada protótipo.

<b>Protótipo</b>	<b>Mudança de concentração detectada pelo protótipo (µg/L)</b>
C1	210
C2	139
C3	115
O1	224
O2	340
O3	348
Q1	566
Q2	416
Q3	638

Fonte: Autoria própria.

Desta forma, evidencia-se o destaque da sensibilidade dos protótipos circulares, ao perceberem as mínimas variações de concentração, seguidos dos protótipos octogonais e quadrados. A explicação para isso está, inicialmente, no fato de que a otimização das dimensões ocorreu apenas para o formato circular. Os outros tiveram suas dimensões adaptadas para maior semelhança com os protótipos circulares. Dessa forma, por ter mais arestas que os protótipos quadrados e, portanto, maior semelhança geométrica, os octogonais tiveram desempenho mais semelhante aos circulares. Percebe-se também uma menor expressividade do volume de MUT na sensibilidade dos sensores.

## 5. CONCLUSÕES

Ao fim deste trabalho, percebe-se que a fundamentação teórica foi importante para a determinação dos melhores valores para as concentrações das suspensões de cobre utilizadas na metodologia, além de motivar a proposta de uma nova técnica para sua medição, devido à complexidade das técnicas usuais apresentadas. Também foram fundamentais os conceitos e estudos sobre antenas de microfita apresentados, que embasaram a metodologia e as discussões sobre os resultados encontrados.

As suspensões de cobre foram preparadas em concentrações satisfatórias e adequadas aos valores máximos regulamentados por órgãos nacionais e internacionais e as medições de suas permissividades e tangente de perdas mostraram que elas podem ser diferenciadas eletromagneticamente.

Foram propostas geometrias de sensores que conseguiram verificar nas simulações deslocamentos nas frequências de ressonância diferentes para cada suspensão de cobre e tais sensores propostos foram devidamente fabricados em três protótipos para cada formato e, em seguida medidos e simulados.

Todos conjuntos das medições para cada formato apresentaram uma dispersão representada por um desvio padrão abaixo de 10% em relação à média. Essas medições tiveram uma adequação aos valores simulados quantificados pelo desvio máximo de 13,87% do menor valor e de 8,40% do maior valor de frequência ressonante. Além disso, os valores simulados e medidos corresponderam à tendência fundamentada na teoria de que a diminuição da permissividade pelo aumento da concentração de cobre na água provoca um aumento da frequência ressonante. Dessa forma, as medições corresponderam bem aos valores esperados a partir dos encontrados na simulação.

Os protótipos circulares apresentaram as maiores variações percentuais de deslocamento de frequência entre duas concentrações consecutivas, com destaque para as faixas de 4 mg/L a 6 mg/L (6,7%) no protótipo C2, além de 0 mg/L e 2 mg/L (6,2%) e 2 mg/L e 4 mg/L (6,2%) no protótipo C1, demonstrando maiores sensibilidades nestas faixas.

Os deslocamentos da frequência de ressonância  $\Delta f_{0-i}$  e  $\Delta f_{V-i}$  foram analisados utilizando como referência, respectivamente, as frequências ressonantes quando o local

do MUT era preenchido com água destilada e quando ele não era preenchido, tendo as medidas desses valores apresentado valores baixos e semelhantes percentualmente em relação às suas médias. Dessa forma, os modelos encontrados com essas duas variáveis para cada protótipo têm níveis de confiança semelhantes entre si.

Esses modelos foram obtidos a partir da regressão linear e obtenção da equação da reta ajustada aos dados encontrados, com seus valores de coeficiente angular, linear e  $R^2$ . Os resultados dos valores de  $R^2$  foram, em média, 0,993, 0,982 e 0,973 para os protótipos quadrados, octogonais e circulares, respectivamente, sendo esta a ordem de confiabilidade dos modelos obtidos para os formatos.

Em relação ao coeficiente angular, em MHz/mg/L, suas médias obtidas nos modelos dos formatos circulares, octogonais e quadrados, respectivamente, foram de 32,94 MHz/mg/L, 16,37 MHz/mg/L e 9,15 MHz/mg/L, sendo esta a ordem decrescente de sensibilidade dos protótipos obtidos. Considerando o passo da medição de 4,79 MHz, essa mesma ordem de formatos consegue verificar uma mudança de concentração de, respectivamente, 145  $\mu\text{g/L}$ , 293  $\mu\text{g/L}$  e 523  $\mu\text{g/L}$  de cobre na água, sendo, então, todos suficientes para detectar os limites máximos estabelecidos pelos órgãos.

Dessa forma, esse estudo cumpriu seus objetivos específicos e o seu objetivo geral, podendo basear trabalhos futuros, os quais podem seguir sugestões como:

- Validação dos sensores e dos modelos obtidos a partir da comparação com valores de concentração encontrados pela medição de suspensões de cobre por técnicas usuais;
- Análise do desempenho de outros substratos no sensor proposto que aumentem o efeito de franjamento;
- Utilização de outros tipos de ressonadores, topologias e formatos;
- Proposta de sensores que uniformizem a distribuição do volume de diferentes MUTs sobre ele;
- Fabricação de protótipos que permita que eles sejam mais uniformes;
- Diminuição do passo da medição para obter maior sensibilidade;
- Estudo do desempenho dos sensores propostos para outros metais pesados.

## REFERÊNCIAS

ARAÚJO, João Batista dos Santos; PINTO FILHO, Jorge Luís de Oliveira. Identificação de fontes poluidoras de metais pesados nos solos da bacia hidrográfica do Rio Apodi-Mossoró/RN, na área urbana de Mossoró-RN. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, Mossoró, v. 5, n. 2, p. 80-94, jun. 2010.

BALANIS, C. A. **Teoria de Antenas: Análise e Projeto**, vol. 2. 3. Ed. LTC, 2009.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução nº 396**, de 3 de abril de 2008. Dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento das águas subterrâneas e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 3 abr. 2008.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução nº 397**, de 3 de abril de 2008. Altera o inciso II do § 4º e a Tabela X do § do 5º, ambos do art. 34 da Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA no 357, de 2005, que dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelecer as condições e padrões de lançamentos de efluentes. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 3 abr. 2008.

BRASIL. Ministério da Saúde. **Portaria GM/MS nº 888**, de 4 de maio de 2021. Altera o Anexo XX da Portaria de Consolidação GM/MS nº 5, de 28 de setembro de 2017, para dispor sobre os procedimentos de controle e de vigilância de qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 4 maio 2017.

COLLIN, Robert E. **Engenharia de microondas**. 1. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1979.

COLZATO, Marina. **Fundamentos ICP OES**. Google, 2020. Disponível em: <https://cmaa.esalq.usp.br/fundamentos-icp-oes/>. Acesso em: 03, abr. 2020. Centro Nacional de Informações sobre Biotecnologia. Pubchem. 2023. Disponível em: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Lithiumcarbonate#section=ComputedProperties>. Acesso em: 02 jan. 2024.

DEIBNASSER, C. Campos; SANTOS, José C.A.; BORGES, L. E. P. Investigation of Thermal Effects in Coaxial Probe Method and Dielectric Characterization of Glycerol up to 140°C. **Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Application**, v. 18, n. 1 p. 1-17, 2019.

EBRAHIMI, A.; WITHAYACHUMNANUL, W.; AL-SARAWI, S.; ABBOT, Derek. High-Sensitivity Metamaterial-Inspired Sensor for Microfluidic Dielectric Characterization. **IEEE Sensors Journal**, v. 14, n. 5, p. 1345-1352-237, 2014.

FAO (ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS PARA A ALIMENTAÇÃO E A AGRICULTURA). **Water pollution from agriculture: a global review**. Roma: ONUFA, 2017. 29 p.

HARRIS, Daniel C. **Análise Química Quantitativa**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2001.

HAYT JR., William H.; BUCK, John A. **Eletrromagnetismo**. 8. ed. Tradução de Marco Aurélio de Oliveira Schroeder. Porto Alegre: AMGH, 2013.

HAQ, Tanveer ul; RUAN, Cunjun; ZHANG, Xingyun; ULLAH, Shahid. Complementary Metamaterial Sensor for Nondestructive Evaluation of Dielectric Substrates. **Sensors**, v. 19, 2019.

HOLANDA, S. M.. **Estudo e desenvolvimento de antenas de microfita utilizando tecido de malha a base de fibras têxteis compostas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró/RN, 2016. 147f.

KIM, H. K.; YOO, M.; LIM, S. Novel Ethanol Chemical Sensor Using Microfluidic Metamaterial. In: IEEE International Symposium on Antennas and Propagation USNC/URSI National RadiScience Meeting, Vancouver, Canada, 2015. pp. 1358-1359.

LACE, A.; CLEARY, J. A Review of Microfluidic Detection Strategies for Heavy Metals in Water. **Chemosensors** **2021**, 9, 60, Março 2021.

LIU, Weina; SUN, Haoran; XU, Lei. A Microwave Method for Dielectric Characterization Measurement of Small Liquids Using a Metamaterial-Based Sensor. **Sensors**, v. 18, 2018.

LACE, A.; CLEARY, J. A Review of Microfluidic Detection Strategies for Heavy Metals in Water. **Chemosensors** **2021**, 9, 60, Março 2021.

OLIVEIRA, Camila T. A. **Distribuição espacial de metais na água, sedimentos e macrófitas aquáticas em um rio do Semi-Árido brasileiro**. 2019. 72 f. Dissertação (Mestrado em Ecologia e Conservação) - Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró/RN, 2019.

OLIVEIRA, Hevla. K. M.. **Análise paramétrica de antena de microfita reconfigurável com metassuperfície do tipo Anel Circular Fendido Complementar**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró/RN, 2021. 82f.

OLIVEIRA, J. G. D.; PINTO, E. N. M. G; SILVA NETO, V. P.; ASSUNÇÃO, A. G. D.. CSRR-Based Microwave Sensor for Dielectric Materials Characterization Applied to Soil Water Content Determination. **Sensors**, v. 20, 2020.

ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE (OMS). **Guidelines for drinking-water quality**. 4. ed. Genebra: OMS, 2022. 614 p.

PEREIRA, V. M.; HARDT, L. G.; FANTINELI, D. G; HECKLER, M. V. T.; ARMAS, L. E. G. Characterization of dielectric properties of graphene and graphite using the resonant cavity in 5G Test Band. **Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Application**, v. 22, n. 1 p. 63-76, 2023.

POZAR, David M. **Microwave engineering**. 4. ed. Hoboken, NJ: Wiley, 2012.

REYES-VERA, Erick; ACEVEDO-OSORIO G.; ARIAS-CORREA, M.; SENIOR, David E. A Submersible Printed Sensor Based on a Monopole-Coupled Split Ring Resonator for Permittivity Characterization. **Sensors**, v. 19, 2019.

SADIKU, Matthew N. O. **Elementos de eletromagnetismo**. 3. ed. Tradução de Lianc Ludwig Loder e Jorge Amorçetti Lisboa. Porto Alegre: Bookman, 2004.

SILVA, L. G.; BARATTA, I. A.; ASSIS, R. R.; BELLEI, L. N.; ANDRADE, C. B.; CERQUEIRA S. JR, A. Electromagnetic Characterization of Aircraft Composite Materials and its Effects on the Antenna Performance. **Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Application**, v. 16, n. 1 p. 218-236, 2017.

SILVA JUNIOR, Paulo F.; SANTANA, Ewaldo E. C.; PINTO, Mauro S. Silva; ANDRADE, Everson P.; CARVALHO, Joabson N.; FREIRE, Raimundo C.S.; OLVEIRA, Maciel A.; OLIVEIRA, Elder E. Carneiro. Characterization of the Dielectric Properties of Tommy Atkins Mango. **Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Application**, v. 19, n. 1 p. 86-93, 2020.

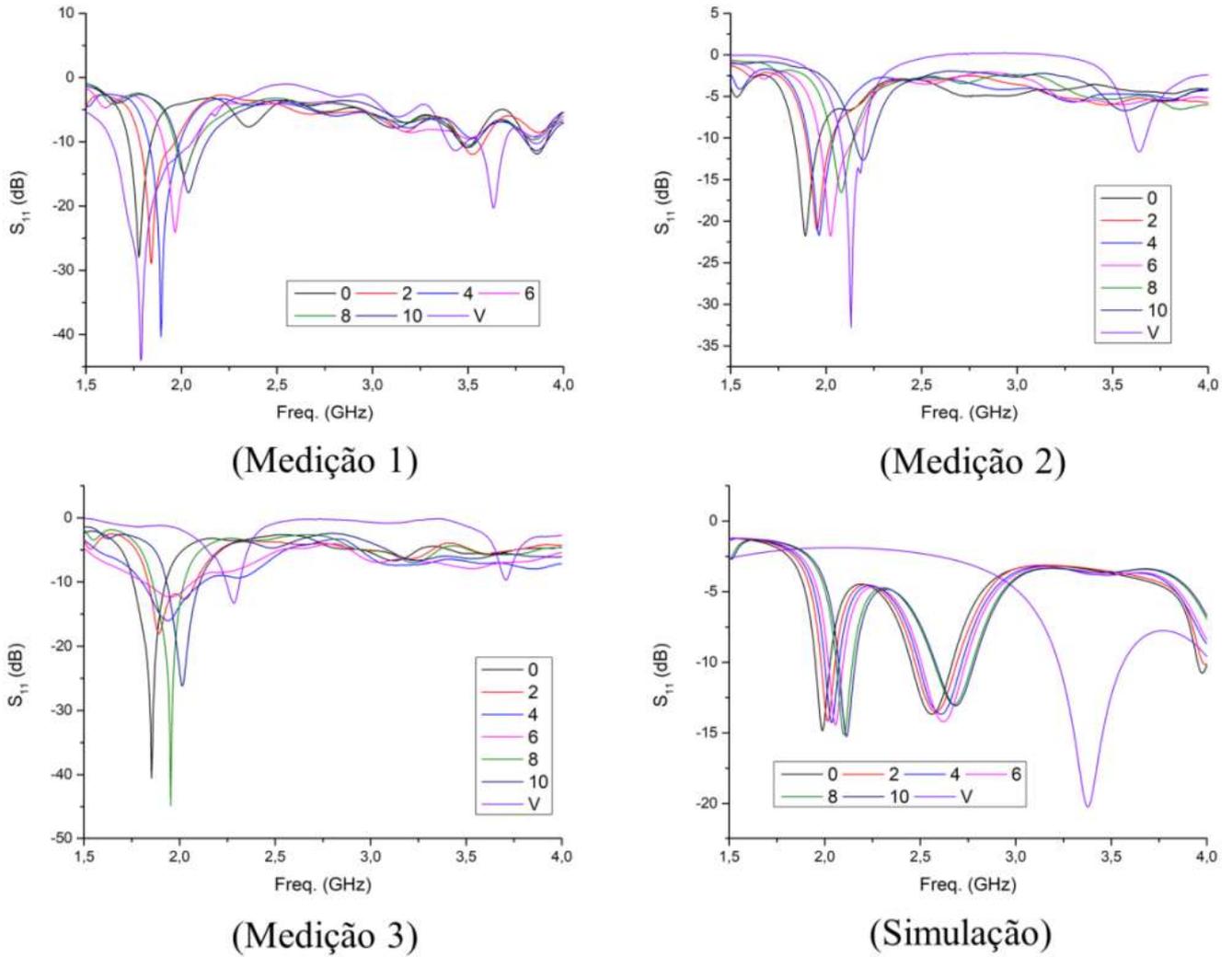
UFTPR. Espectrofotômetro. [S.l.], 09 jan. 2017. Disponível em: <http://www.utfpr.edu.br/cursos/coordenacoes/stricto-sensu/ppgtamb/ppg-tamb/area-academica/infraestrutura/equipamentos/espectrofotometro/view>. Acesso em: 09 abr. 2023.

WITHAYACHUMNANKUL, W.; JARUWONGRUNGSEE, K.; TUANTRANONT, A.; FUMEAUX, C.; ABBOT, D. Mematerial-based microfluidic sensor for dielectric characterization. **Sensors and Actuators A: Physical**, v. 189, p. 233-237, 2013.

ZHANG, Kunyi *et al.* Microwave Sensing of Water Quality. **IEEE Access**, v. 7, p. 52018-52030, maio de 2019. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2918996.

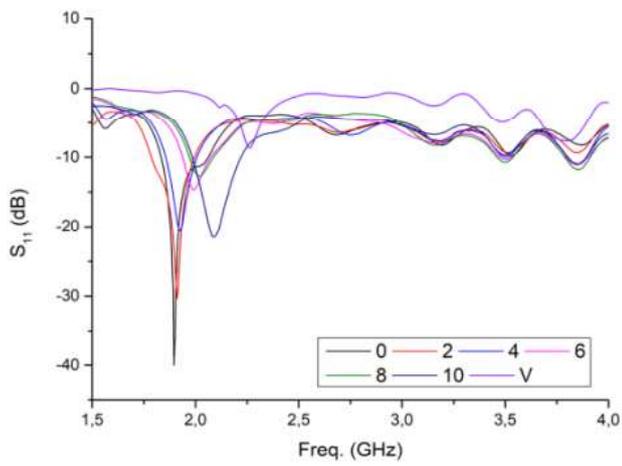
## APÊNDICE A – CURVAS DE COEFICIENTE DE REFLEXÃO MEDIDAS E SIMULADAS PARA CADA PROTÓTIPO

Figura 25 - Curvas do coeficiente de reflexão para o protótipo C1.

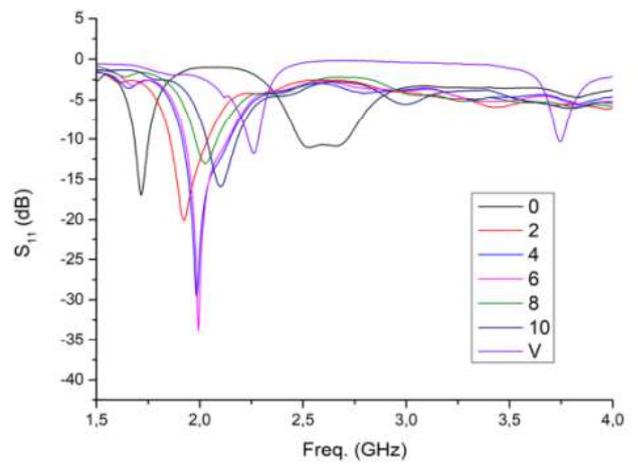


Fonte: Autoria própria

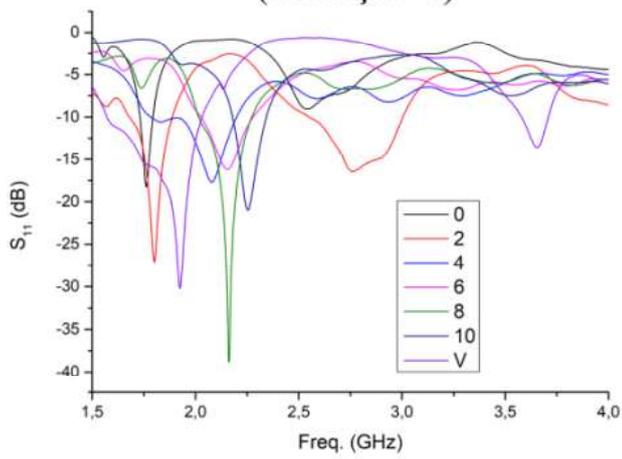
Figura 26 - Curvas do coeficiente de reflexão para o protótipo C2.



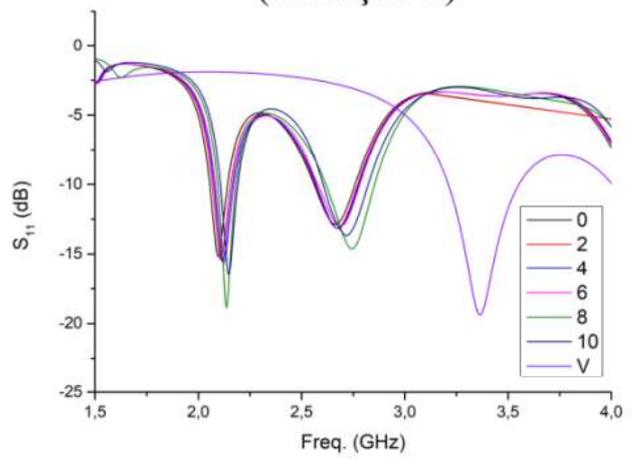
(Medição 1)



(Medição 2)



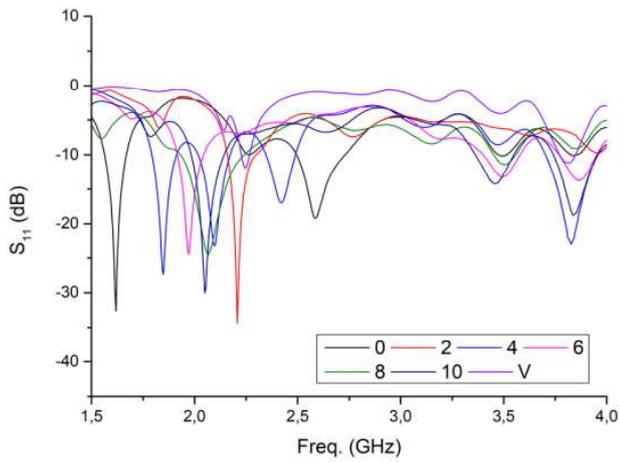
(Medição 3)



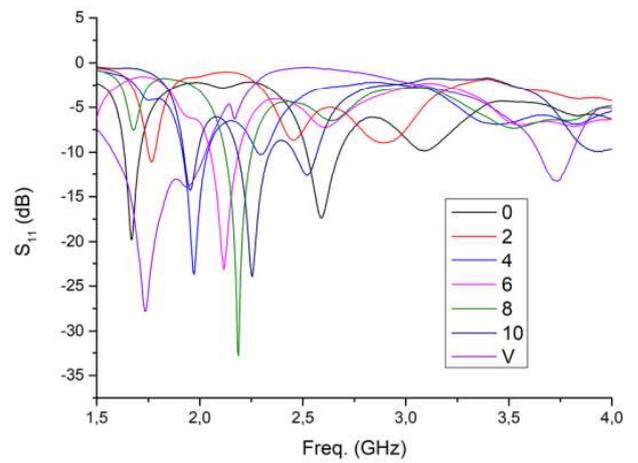
(Simulação)

Fonte: Autoria própria

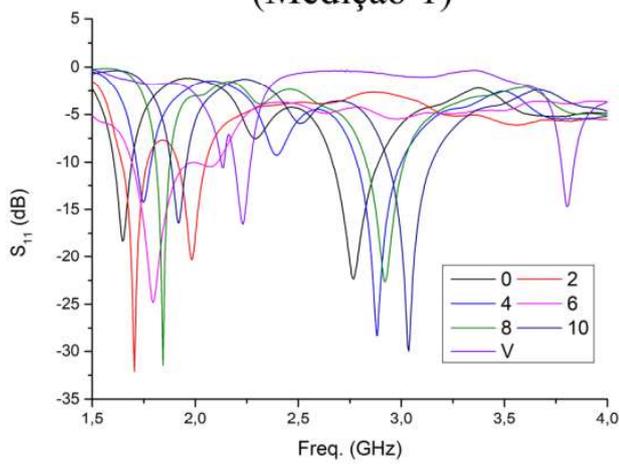
Figura 27 - Curvas do coeficiente de reflexão para o protótipo C3.



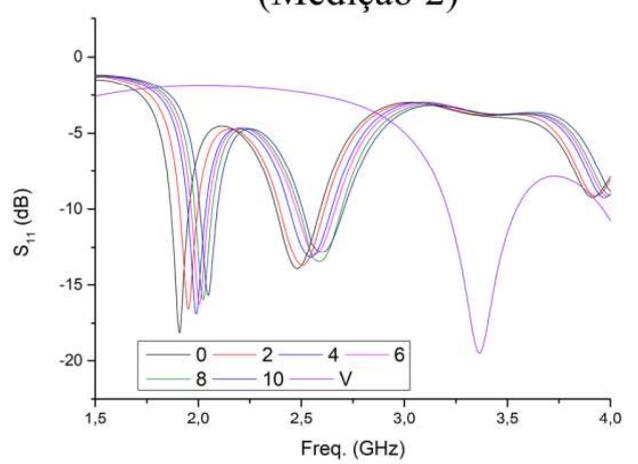
(Medição 1)



(Medição 2)



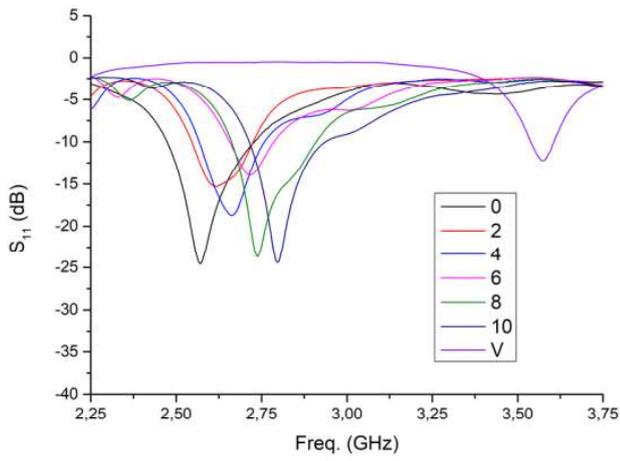
(Medição 3)



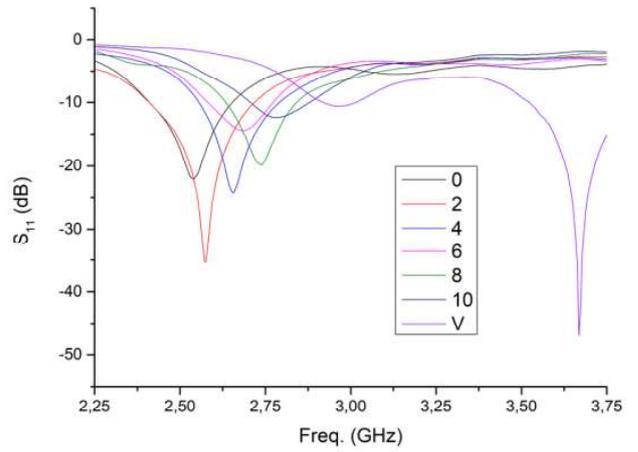
(Simulação)

Fonte: Autoria própria

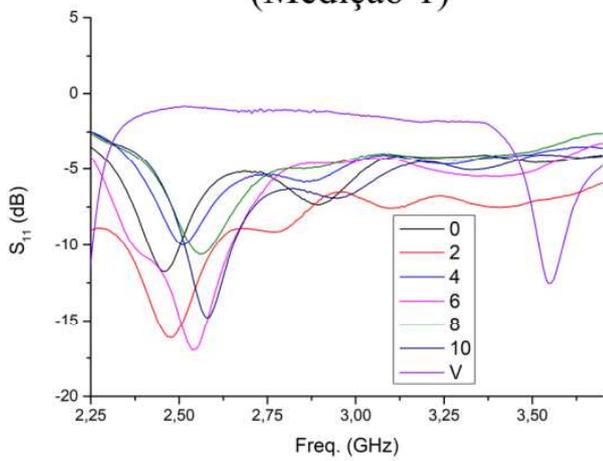
Figura 28 - Curvas do coeficiente de reflexão para o protótipo O1.



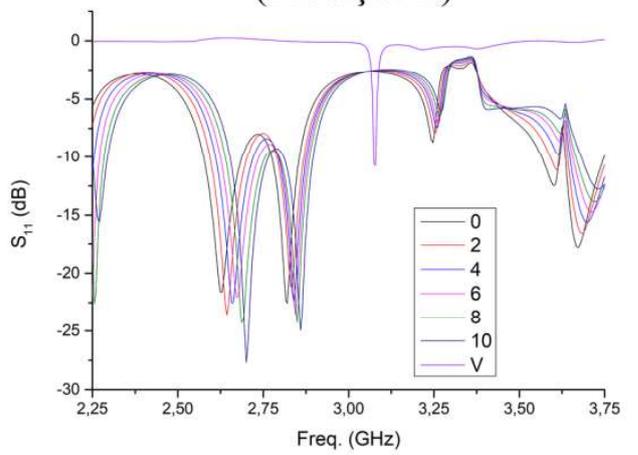
(Medição 1)



(Medição 2)



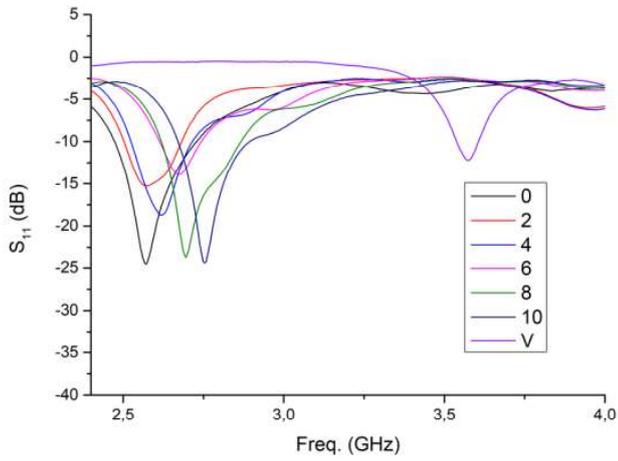
(Medição 3)



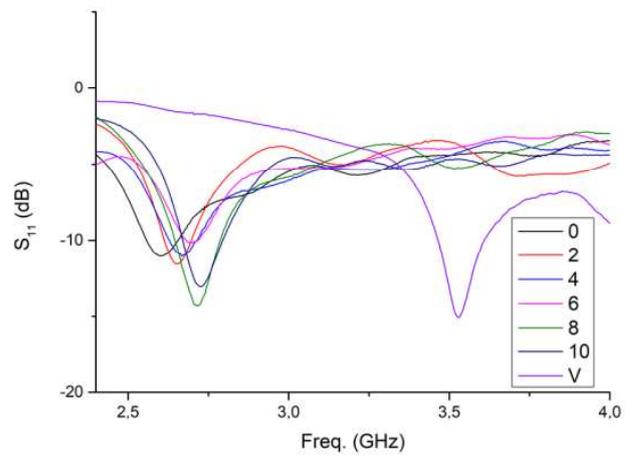
(Simulação)

Fonte: Autoria própria

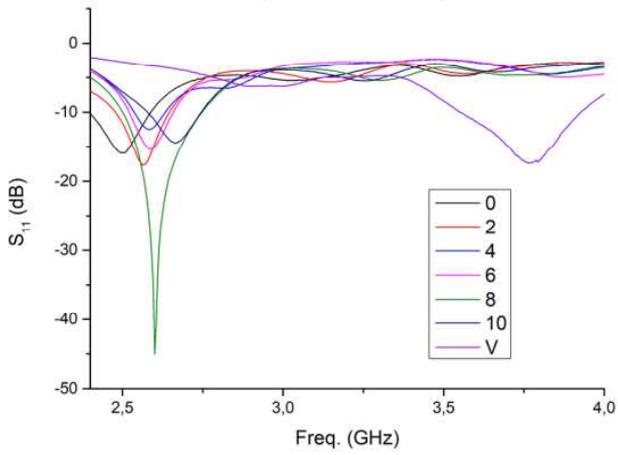
Figura 29 - Curvas do coeficiente de reflexão para o protótipo O2.



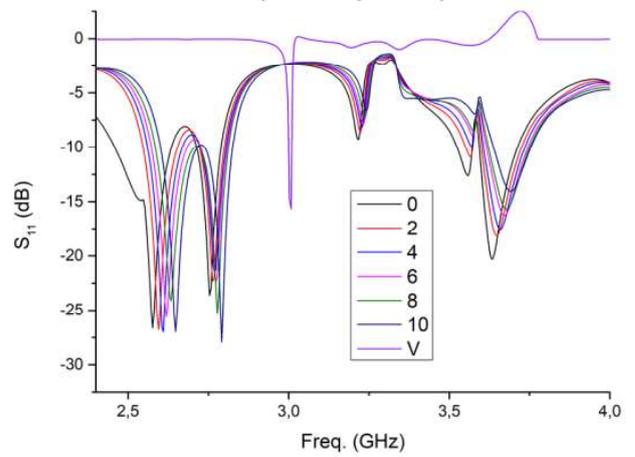
(Medição 1)



(Medição 2)



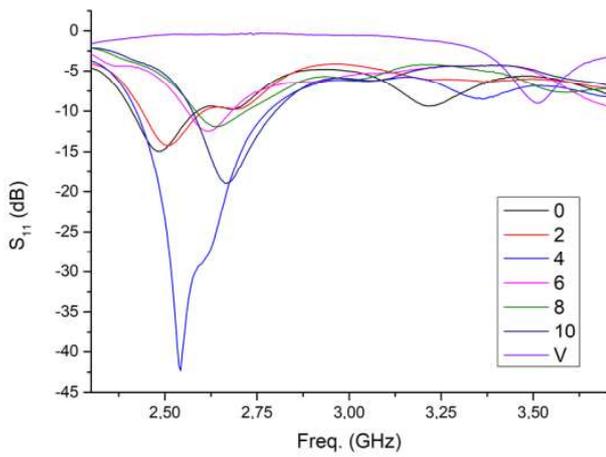
(Medição 3)



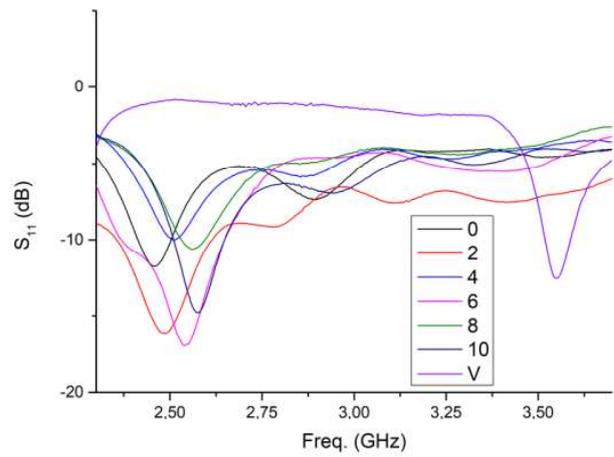
(Simulação)

Fonte: Autoria própria

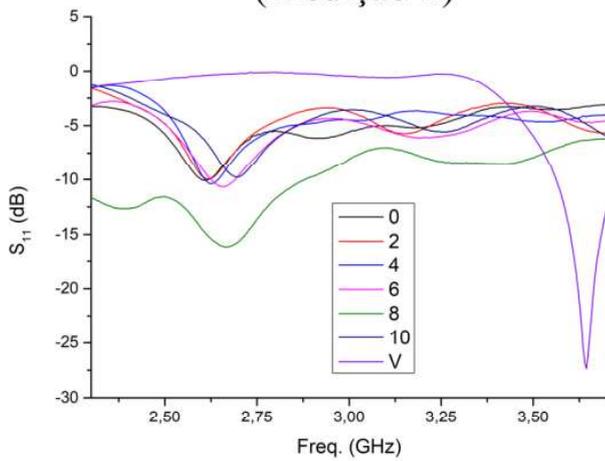
Figura 30 - Curvas do coeficiente de reflexão para o protótipo O3.



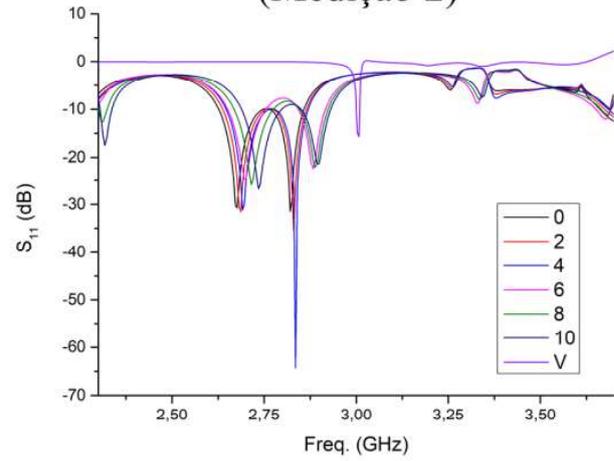
(Medição 1)



(Medição 2)



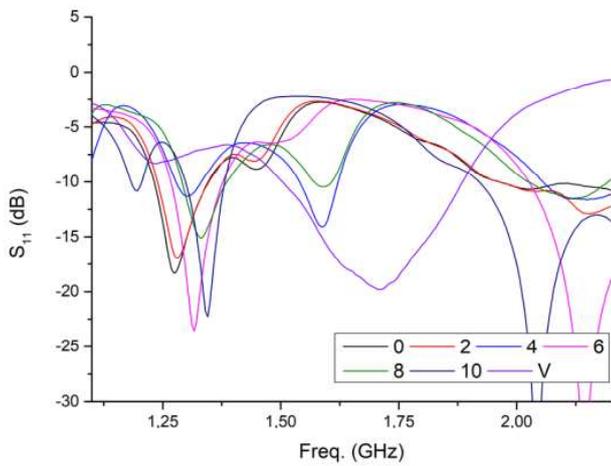
(Medição 3)



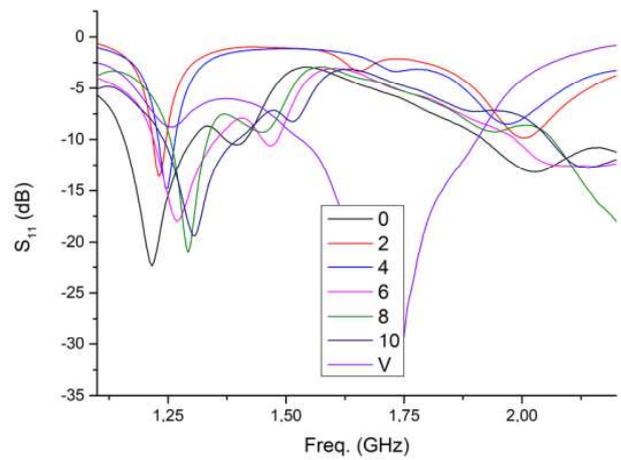
(Simulação)

Fonte: Autoria própria

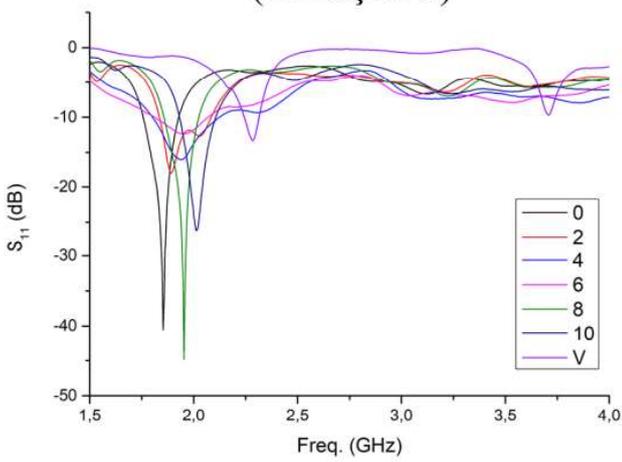
Figura 31 - Curvas do coeficiente de reflexão para o protótipo Q1.



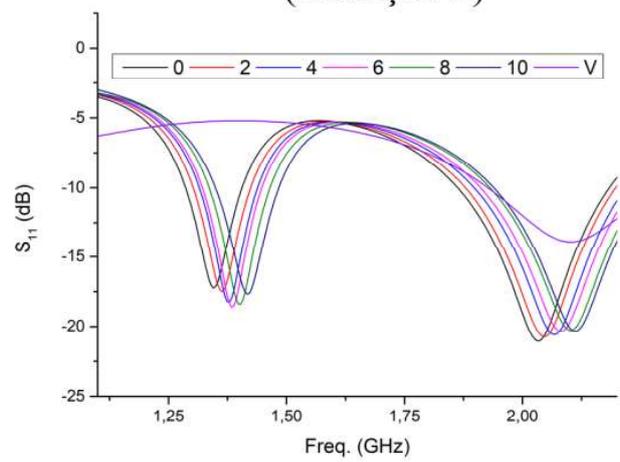
(Medição 1)



(Medição 2)



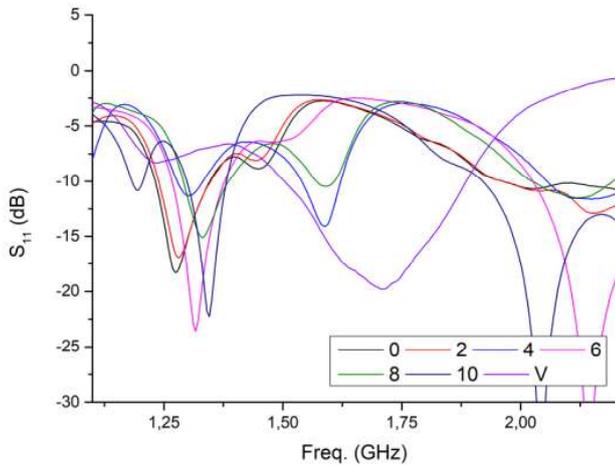
(Medição 3)



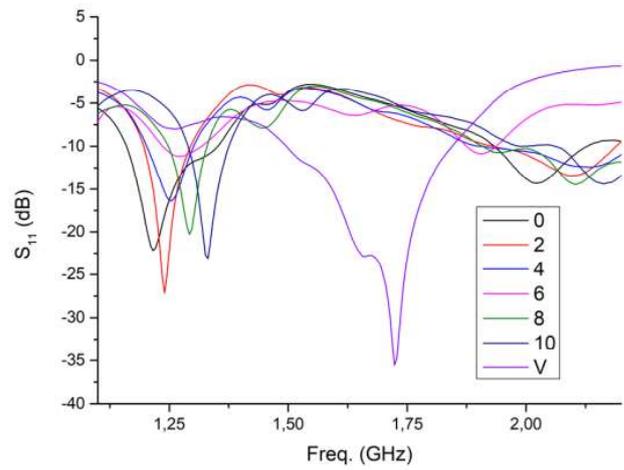
(Simulação)

Fonte: Autoria própria

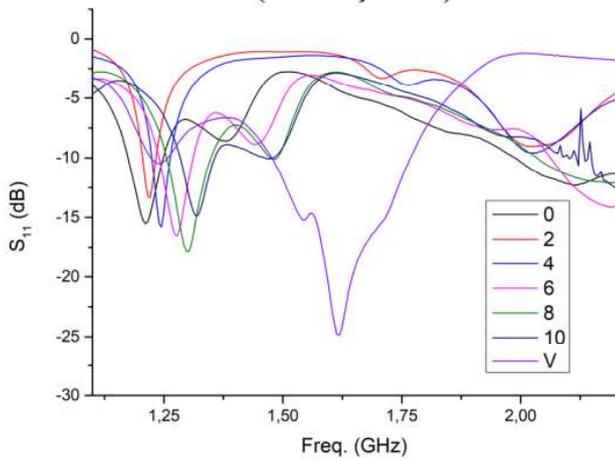
Figura 32 - Curvas do coeficiente de reflexão para o protótipo Q3.



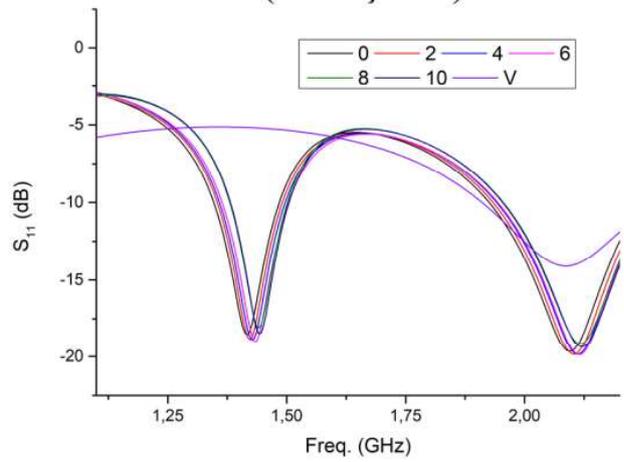
(Medição 1)



(Medição 2)



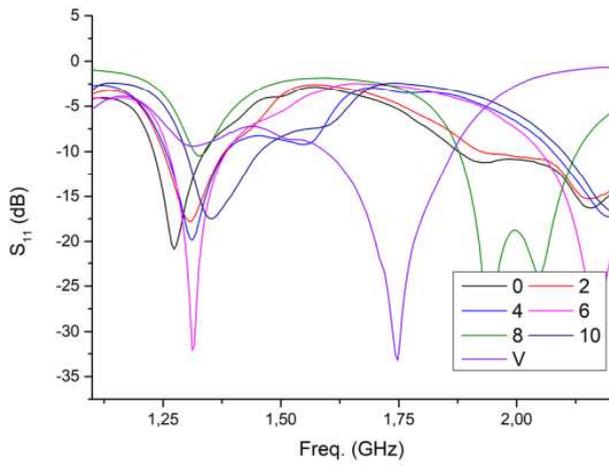
(Medição 3)



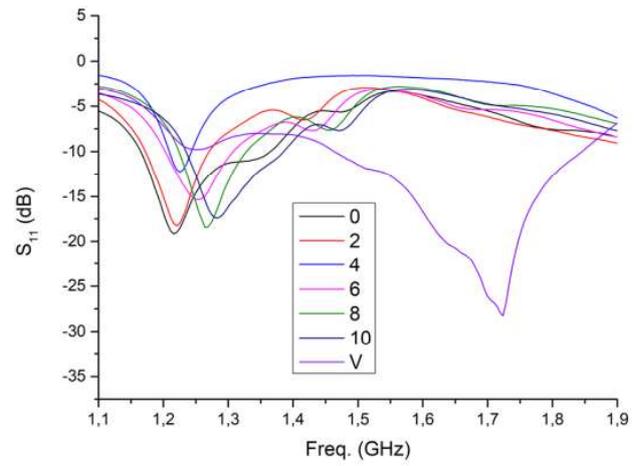
(Simulação)

Fonte: Autoria própria

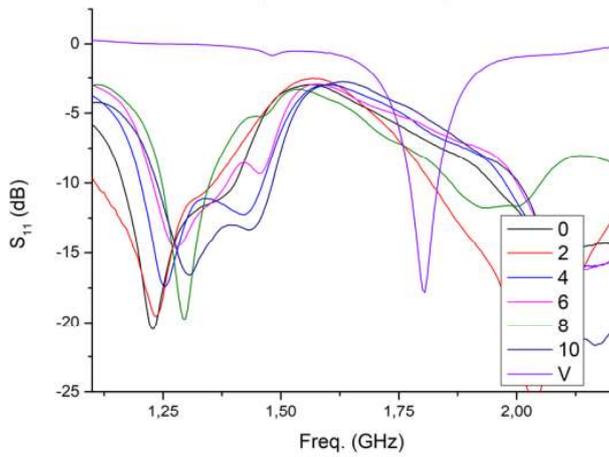
Figura 33 - Curvas do coeficiente de reflexão para o protótipo Q3.



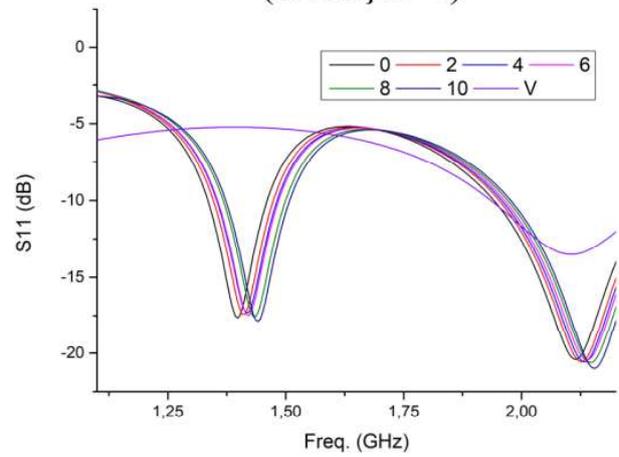
(Medição 1)



(Medição 2)



(Medição 3)



(Simulação)

Fonte: Autoria própria