

Estudo Comparativo de Ressonadores Meta-Inspirados para Detecção de Cobre em Corpos de Água

Alyson L. M. de Araújo, Humberto D. de Andrade, Ingrid K. C. de Melo, Mateus H. A. M. Melo, Ruann V. A. Lira e Isaac B. T. Silva

Resumo—Neste estudo, foram simulados três sensores com substrato de poliácido láctico e ressonadores meta-inspirados em diferentes formatos, com dimensões semelhantes para comparar sua sensibilidade na identificação de cobre em corpos de água na faixa de frequência de microondas. As propriedades dielétricas de água com três concentrações de cobre foram medidas e utilizadas como dados de entrada para as simulações. A análise da sensibilidade partiu das diferenças de frequências de ressonância das curvas de coeficiente de reflexão da resposta simulada em cada concentração. O sensor com o formato circular se destacou com uma variação de 20 MHz ao variar a concentração em 10 mg/L.

Palavras-Chave—SRR, sensoriamento por micro-ondas, caracterização de amostras de água.

Abstract—In this study, three sensors with polylactic acid substrate and meta-inspired resonators were simulated in different shapes and similar dimensions to compare its sensibility on copper detection at water bodies. The dielectric properties of water at three concentrations of copper were measured to be input data to simulations. The sensibility analysis came from differences between the resonant frequencies of the reflection coefficient simulated in each concentration. The sensor with circular shape stood out with a 20 MHz variation when varying the concentration by 10 mg/L.

Keywords—SRR, microwave sensing, water samples characterization.

I. INTRODUÇÃO

A monitorização atual da qualidade da água é insuficiente para acompanhar o aumento da poluição por contaminantes [1]. Isso se deve, por exemplo, à complexidade dos instrumentos de detecção, como a espectrofotometria atômica no caso dos metais pesados. Portanto, é necessário simplificar a monitorização para ampliá-la, permitindo avaliar adequadamente a poluição e implementar medidas de proteção. Alternativas como o uso de sensoriamento por micro-ondas usando antenas de microfita, por exemplo, surgem como possíveis soluções nesse contexto, porque atendem à demanda de simplicidade e ainda apresentam baixo custo e consumo de energia.

Usando-as, o estudo em [1] demonstrou que é possível obter deslocamentos de frequência substituindo o Material Sob Teste (*material under test - MUT*) em um arranjo de

anéis fendidos ressonadores complementares (*complementary split-ring resonator - CSRR*) alimentados por uma linha de transmissão, operando em diferentes frequências. Essa abordagem permite a caracterização de amostras de água com diferentes contaminantes por meio da análise do coeficiente de transmissão e da permissividade complexa. Além disso, um ressonador baseado em CSRR também foi utilizado em [2] para caracterizar amostras de solo com diferentes níveis de umidade.

Sensores baseados em CSRR também foram desenvolvidos em [3] e [4] para caracterizar misturas de água e etanol com diferentes concentrações. O estudo em [5] utilizou anéis fendidos ressonadores com cruz (*split-ring cross resonators - SRCR*) por meio da análise de absorvidade, que envolve o coeficiente de reflexão e transmissão, bem como a permissividade relativa. Essas abordagens usando metamateriais e ressonadores se mostram promissoras na análise de substâncias em vários contextos.

Entre os estudos recentes que empregam detecção por micro-ondas, não há uma análise específica da concentração de metais pesados em amostras de água, o que é importante já que sua concentração elevada pode ser prejudicial ao ser humano. Por exemplo, se esse contaminante for o cobre, a concentração, segundo [6], pode ser prejudicial em valores a partir de 0,005 mg/L a 0,013 mg/L, dependendo do tipo de corpo de água. Além disso, há uma predominância no uso do coeficiente de transmissão como a variável correlacionada com a concentração de contaminantes, o que adiciona complexidade prática ao processo de detecção, já que a inserção de uma outra porta aumenta a quantidade de material utilizado e a possibilidade de erros de fabricação e consequentes diferenças entre resultados medidos para simulados.

Para abordar a falta de informações detalhadas sobre o desempenho de sensores de metais pesados utilizando o coeficiente de reflexão, pretende-se apresentar uma comparação de diferentes sensores propostos na identificação de cobre metálico em água com base na análise desse parâmetro simulado no *software ANSYS® Eletromagnetics Suite, Release 2019.2* com MUTs com diferentes concentrações de cobre.

II. CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS DE ÁGUA CONTAMINADAS

Para obter a resposta simulada do coeficiente de reflexão desses sensores quando amostras de água com diferentes concentrações de cobre são utilizadas como MUT, foram medidas

Alyson L. M. de Araújo, email: alyson.araujo@alunos.ufersa.edu.br; Humberto D. de Andrade, e-mail: humbertodionisio@ufersa.edu.br; Ingrid K. C. de Melo, e-mail: ingryd.melo@alunos.ufersa.edu.br; Mateus H. A. M. Melo, e-mail: mateushamm@gmail.com; Ruann V. A. Lira, e-mail: ruannvic-tor@gmail.com; Isaac B. T. Silva, e-mail: isaac.barros@ufersa.edu.br. Todos os autores são afiliados ao Centro de Engenharias, UFRSA, Mossoró-RN.

as caracterizações das amostras de água que serão modeladas no *software*. Inicialmente, foram preparadas soluções de água destilada com pó de cobre metálico de pureza 99,6% nas concentrações de 0 mg/L, 8 mg/L e 10 mg/L. As duas últimas foram submetidas a agitação magnética por várias horas até que o pó estivesse completamente dissolvido. A permissividade real (ϵ') e a tangente de perda dielétrica ($\tan \delta$) foram então medidas de 0,2 GHz a 8,5 GHz para cada solução, com um passo de 16 MHz, através de um Vector Network Analyzer (VNA) Rohde Schwarz, modelo ZND (100 kHz – 8,5 GHz), associado a um kit de medição Dielectric Assessment Kit (DAK) 3.5 SPEAG (200 MHz – 20 GHz). Os resultados são apresentados na seção "Resultados e Discussão".

III. CRITÉRIO PARA SENSIBILIDADE DOS SENSORES

Como critério objetivo para determinar o quão separadas eram as curvas do coeficiente de reflexão visando uma melhor identificação da contaminação, foram registradas as frequências de ressonância f_0 , f_8 e f_{10} das concentrações de cobre de, respectivamente, 0 mg/L, 8 mg/L e 10 mg/L. Essas frequências foram determinadas observando-se a frequência em que o coeficiente de reflexão possuísse o menor valor. Para uma melhor precisão, observando a frequência de ressonância aproximada de 1 a 10 GHz, simulava-se a resposta num intervalo de 1 GHz que a contivesse em 701 pontos, tendo, portanto, um passo de aproximadamente 1,4 MHz. Com esses valores, os deslocamentos de frequência Δf_{0-8} , Δf_{0-10} e Δf_{8-10} foram calculados usando a Equação (1). O sensor foi considerado mais sensível quanto maiores fossem os valores dos deslocamentos de frequência apresentados.

$$\begin{aligned} \Delta f_{0-8} &= f_8 - f_0 \\ \Delta f_{0-10} &= f_{10} - f_0 \\ \Delta f_{8-10} &= f_{10} - f_8 \end{aligned} \quad (1)$$

IV. PROPOSTA DE SENSORES

Os sensores propostos têm duas camadas. Na primeira foi utilizado um substrato de polilático (PLA), devido à disponibilidade do mesmo no laboratório, com dimensões $a = 40\text{mm}$ e $b = 20\text{mm}$ e altura de 3 mm. A segunda, posicionada na parte anterior do substrato é uma placa de cobre (terra) que possui essas mesmas dimensões. No interior do substrato, posicionada na metade da sua altura, é inserida uma parte metálica (*patch*) em que estarão os ressoadores de anel fendido (*split-ring resonator* - SRR) com três diferentes formatos, como mostra a Fig. (1).

Entre os anéis, se deposita o material sob teste (MUT), que consistem nas amostras de água contaminadas, que cobrem toda a altura do substrato. Os anéis do sensor 1 são circulares (Fig. 1a) com o externo possuindo diâmetro c , os do sensor 2 são quadrados (Fig. 1b) tendo o externo um lado c e os do sensor 3 são octógonos regulares (Fig. 1c) cujo dobro da apótema é c . A distância entre os anéis tem tamanho de d e cada anel possui uma largura de e . Existem duas fendas quadradas nos anéis, com largura de f e altura igual à largura dos anéis. Os valores das dimensões são mostrados na Tabela I. Os ressoadores são alimentados por uma linha de transmissão, cuja largura é g . A configuração padrão do *software* utilizado

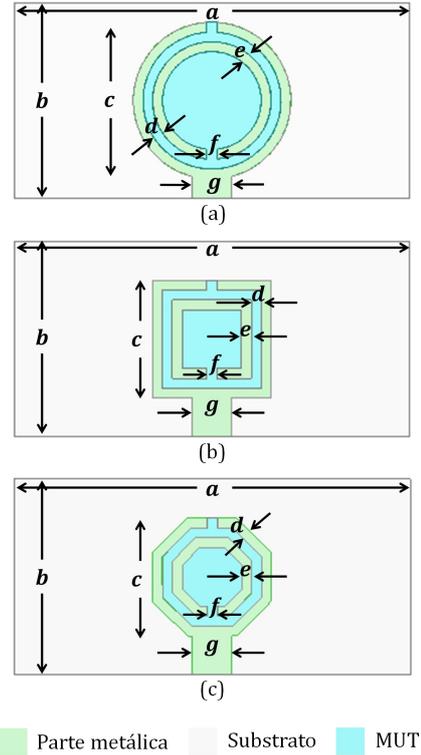


Fig. 1. Geometria do Sensor (a) 1 (b) 2 e (c) 3.

admite que a alimentação incide na porta de excitação (que possui largura igual à linha de transmissão e altura que vai da base do plano de terra ao topo da linha de transmissão) com uma potência média de 1W.

TABELA I
DIMENSÕES DOS SENSORES

Dimensão	Tamanho (em mm)
a	40,00
b	20,00
c	12,00
d	1,00
e	1,00
f	1,00
g	4,00

V. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados da caracterização das soluções de cobre com concentrações de 0 mg/L, 8 mg/L e 10 mg/L relacionados à parte real da permissividade ϵ' e à tangente de perdas dielétricas $\tan \delta$ são mostrados na Fig. (2), estão apresentados os resultados para frequências de 0,2 GHz a 8,5 GHz.

Como pode ser observado na Fig. (2), as curvas estão separadas entre si, especialmente a curva da maior concentração. Isso indica uma diferença desejável no comportamento eletromagnético das diferentes concentrações. Entre as curvas da permissividade ϵ' , existe uma maior distância dos valores da maior concentração até aproximadamente 4 GHz. Já entre as curvas da tangente de perdas dielétricas $\tan \delta$ a maior separação

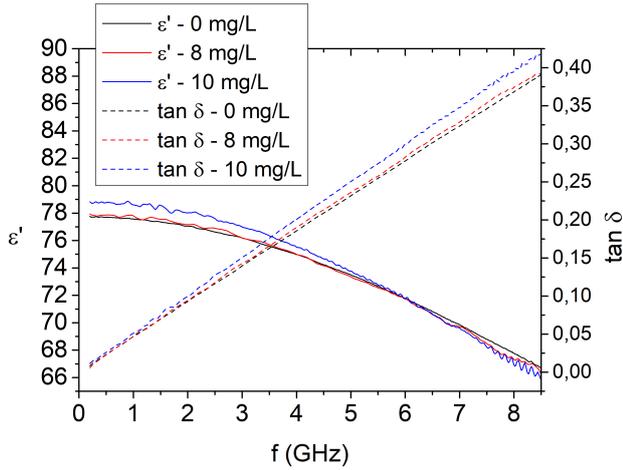


Fig. 2. Resultados da caracterização das soluções quanto à permissividade ϵ' (curvas contínuas) e à tangente dielétrica de perdas $\tan \delta$ (curvas pontilhadas).

entre elas ocorre de forma crescente e entre todas a partir de 4 GHz.

A Fig. (3) apresenta o coeficiente de reflexão do sensor 1 (circular) entre as frequências de 5,5 GHz e 6,5 GHz simulado no *software*.

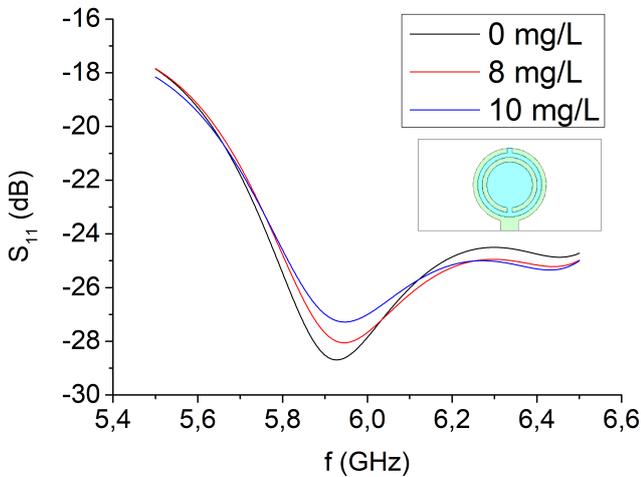


Fig. 3. Curvas do coeficiente de reflexão para o Sensor 1.

As frequências de ressonância de cada curva se encontram próximas a 5,9 GHz, onde apresentam coeficientes de reflexão de aproximadamente -29 dB. A curva de maior concentração teve a maior frequência de ressonância mas o menor módulo do coeficiente de reflexão.

O sensor 2 (quadrado) apresentou resultados simulados no *software* para o coeficiente de reflexão situados entre as frequências de , como mostra a Fig. (4). Nela, a curva de concentração de 10 mg/L apresentou a menor frequência de ressonância, ao contrário do que ocorreu no sensor 1 mas manteve a apresentação do menor módulo do coeficiente de reflexão. As frequências de ressonância se situaram entre 3,9 e 4,0 GHz e os valores do coeficiente de reflexão variaram

entre -28 dB e -24 dB.

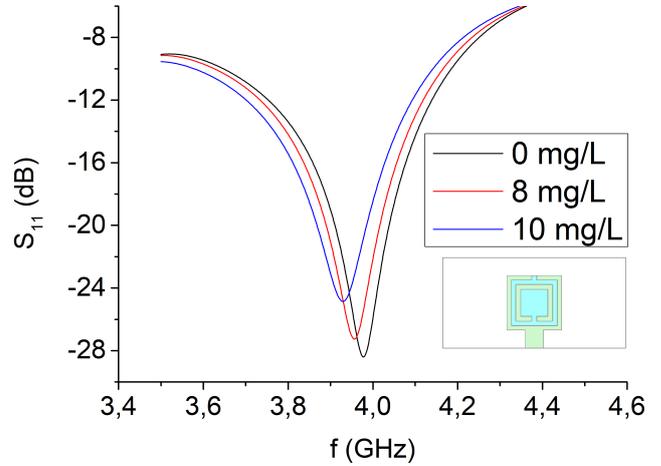


Fig. 4. Curvas do coeficiente de reflexão para o Sensor 2.

A Fig. (5) apresenta o coeficiente de reflexão do sensor 3 (octogonal) simulado entre as frequências de 5,5 GHz e 6,5 GHz.

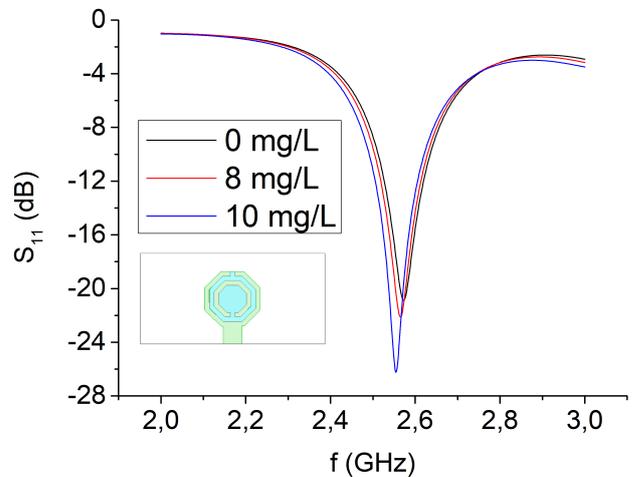


Fig. 5. Curvas do coeficiente de reflexão para o Sensor 3.

A ordem das curvas em cada concentração se assemelhou àquela apresentada pelo sensor 1, tendo as frequências de ressonância se situado entre 2,5 e 2,6 GHz e os valores do coeficiente de reflexão variado entre -28 dB e -20 dB.

Os resultados das frequências de ressonância obtidas nas curvas do coeficiente de reflexão de cada concentração em cada sensor são mostrados na Tabela II.

Os resultados dos deslocamentos de frequência obtidos com a Tabela II e com a Equação 1 são mostrados na Tabela III.

É perceptível que o Sensor 2 apresentou a maior sensibilidade mas o 1 foi o único em que quanto maior a variação de concentração, maior foi a variação de frequência.

TABELA II

FREQUÊNCIAS DE RESSONÂNCIA APRESENTADAS POR CADA SENSOR (EM GHZ)

Sensor	f_0	f_8	f_{10}
1	5,9271	5,9457	5,9471
2	3,9771	3,9557	3,9300
3	2,5729	2,5657	2,5543

TABELA III

DIFERENÇAS ENTRE FREQUÊNCIAS DE RESSONÂNCIA APRESENTADAS POR CADA SENSOR (EM MHZ)

Sensor	Δf_{8-10}	Δf_{0-8}	Δf_{0-10}
1	1,43	18,57	20,00
2	-25,71	-21,43	-47,14
3	-11,43	-7,14	-18,57

VI. CONCLUSÕES

Os sensores apresentaram deslocamentos na frequência de ressonância ao mudar o MUT por soluções de diferentes concentrações de cobre. Embora as variações de concentração estivessem na faixa de miligramas por litro, os deslocamentos de frequência variaram por vezes em dezenas de megahertz. O Sensor 2 foi o mais sensível, apresentando um deslocamento de quase 47 MHz ao variar de 0 a 10 mg/L. Porém, não houve uma relação de quanto maior a variação da concentração, maior a variação da frequência de ressonância, comportamento esse que foi apresentado unicamente pelo Sensor 1, em que também foi observada uma sensibilidade de 20 MHz numa variação de 10 mg/L. Assim, o Sensor 1 foi julgado como aquele com melhor desempenho neste estudo comparativo, podendo detectar concentrações entre 0 a 10 mg/L de cobre na faixa de 5,8 a 6 GHz. Novas configurações e combinações podem ser testadas para determinar se é possível obter deslocamentos de frequência ainda maiores. Além disso, pode ser estudado também a detecção de concentração de outros metais pesados, tendo este estudo observado apenas o caso do cobre.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), LabMicro, CAPES e à Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) pelo suporte técnico. Este trabalho é apoiado pelo projeto PIB20009-2020.

REFERÊNCIAS

- [1] Kunyi Zhang et al., *Microwave Sensing of Water Quality*. IEEE Access, v. 7, p. 52018-52030, maio de 2019. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2918996.
- [2] João G. D. Oliveira; Érica N. M. G. Pinto; Valdemir P. Silva Neto; Adaildo G. D'Assunção, *CSRR-Based Microwave sensor for dielectric materials*. Sensors, v. 20, n. 1, p. 255, 2020. DOI: 10.3390/s20010255.
- [3] Amir Ebrahimi; Said Al-Sarawi; Withawat Withayachumkankul; Fellow Aboot, *High-Sensitivity Metamaterial-Inspired Sensor for Microfluidic Dielectric Characterization*. IEEE Sensors Journal, v. 14, n. 5, p. 1345-1351, 2014.
- [4] Withawat Withayachumkankul; Kata Jaruwongrungrsee; Adisorn Tuantranont; Christophe Fumeaux; Derek Abbott, *Metamaterial-based microfluidic sensor for dielectric characterization*. Sensors and Actuators A, n. 189, p. 233-237, 2013.

- [5] Hyung Ki Kim; Minyeong Yoo; Sungjoon Lim, *Novel Ethanol Chemical Sensor Using Microfluidic Metamaterial*. 2015 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation USNC/URSI National Radi Science Meeting, Vancouver, Canada, p. 1358-1359, 2015.
- [6] BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. *Resolução nº 357, de 17 de março de 2005*. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 18 mar. 2005. Seção 1, p. 58-63.
- [7] I. F. Costa, *Antenas e superfícies seletivas de frequência reconfiguráveis*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica e Computação) – [UFRN], [Natal/RN], 104 f. 2009.