

SENSORES DE MICRO-ONDAS DE CAMPO PRÓXIMO: UMA ABORDAGEM PARA CARACTERIZAÇÃO DE AMOSTRAS LÍQUIDAS

João Vítor Rodrigues¹ (IC), Diego Camilo Tami López (PQ)¹

¹ Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), campus Itabira.

Palavras-chave: Algoritmo genético. Campo próximo. Caracterização dielétrica. Redes neurais artificiais. Sensor de micro-ondas.

Introdução

A caracterização dielétrica de líquidos tem se consolidado como ferramenta fundamental em aplicações industriais e biomédicas, viabilizando desde o controle de qualidade de soluções até o monitoramento não invasivo de parâmetros fisiológicos (WU; RAPPAPORT; COLLINS, 2015). Sensores de micro-ondas em campo próximo destacam-se nesse cenário por sua capacidade de operar sem contato direto com a amostra, oferecendo elevada sensibilidade e resposta em tempo real (AL-GBURI et al., 2023).

Entre as arquiteturas propostas, os *Complementary Split-Ring Resonators* (CSRRs – ressonadores complementares de anel dividido) apresentam vantagens como miniaturização, seletividade e forte acoplamento capacitivo, favorecendo a detecção de pequenas variações na permissividade dielétrica de materiais líquidos (PO-ZAR, 2011; VELÁSQUEZ et al., 2023). Nessas estruturas, a frequência de ressonância é diretamente influenciada pela geometria do ressonador e pelas propriedades do meio sob teste, o que permite sua aplicação em identificação e diferenciação de soluções químicas e biológicas (ELSHAFEY; ABDALLA; ELHENNAWY, 2021).

Neste trabalho, propõe-se o desenvolvimento e a otimização de um sensor planar baseado em CSRRs, modelado no software COMSOL Multiphysics. Inicialmente, foram realizados estudos paramétricos para avaliar a influência de variáveis geométricas na resposta espectral do dispositivo. Em seguida, foi implementado um modelo preditivo com redes neurais artificiais do tipo Multilayer Perceptron (MLP – perceptron multicamada), empregado como função substituta em um Algoritmo Genético (AG) para otimização da geometria do sensor.

Por fim, foi elaborada uma curva de regressão relacionando a frequência de ressonância à permissividade relativa das amostras testadas, possibilitando a identificação de líquidos desconhecidos. Dessa forma, o es-

tudo integra modelagem computacional, aprendizado de máquina e técnicas evolutivas, consolidando uma metodologia inovadora para o projeto de sensores de micro-ondas para caracterização não invasiva de amostras líquidas.

Metodologia

Inicialmente, foi definida a cadeia de trabalho de simulação em *COMSOL Multiphysics*, contemplando a criação da geometria, atribuição de materiais, definição de portas, geração de malha e análise em regime de frequência.

Em seguida, o dispositivo foi modelado como estrutura planar micro-ondulada baseada em cavidades CSRRs gravadas no plano-terra e alimentadas por linha de microfita com impedância característica $Z_0 = 50 \Omega$. O arranjo geométrico e as regiões funcionais são apresentados na Figura 1, enquanto os parâmetros físicos e dimensionais de referência utilizados nas simulações encontram-se na Tabela 1.

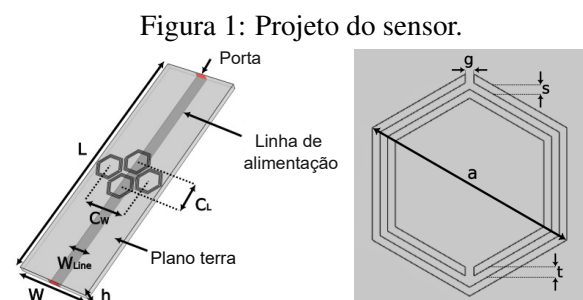


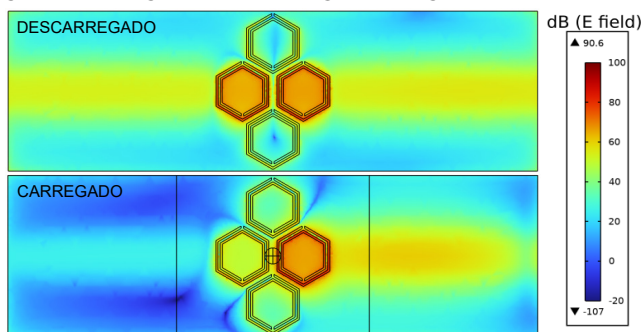
Tabela 1: Parâmetros do sensor micro-ondas.

Parâmetro	Valor	Descrição
L	66 mm	Comprimento do substrato
W	20 mm	Largura do substrato
W_{line}	3 mm	Largura da linha de alimentação
C_W	12 mm	Distância entre centros dos anéis
C_L	7,6 mm	Distância entre centros dos anéis
h	1,6 mm	Espessura do substrato dielétrico
th	0,035 mm	Espessura da camada de cobre
s	0,3 mm	Largura da fenda dielétrica
a	7,6 mm	Comprimento diagonal do anel externo
t	0,3 mm	Largura da fenda no cobre
g	0,3 mm	Espaçamento entre fendas no cobre
Z_0	50Ω	Impedância característica (Ω)

“Do conhecimento acadêmico à transformação sustentável: inovação com validação científica”

As simulações eletromagnéticas foram conduzidas no módulo *Radio Frequency* (RF), em domínio de frequência, com varredura de 2 a 4 GHz. Foram definidas condições de contorno condutor perfeito para o cobre, substrato FR-4 ($\epsilon_r = 4,4$, $h = 1,6$ mm) e excitação por portas em microfita. A malha foi refinada nas regiões de fenda para adequada resolução do campo. Para caracterização da sensibilidade do dispositivo, foram avaliados quatro cenários: sensor descarregado (ar), presença de lâmina de vidro, posicionamento de contêiner vazio e aplicação de gota de água sobre a região sensora. A distribuição típica de campo elétrico para os estados descarregado e carregado com água é ilustrada na Figura 2.

Figura 2: Interação do sensor para amostras descarregada e carregada com uma gota de água.



Para quantificar a influência geométrica, realizou-se estudo paramétrico variando individualmente os parâmetros a , g , s , t e C_L dentro de faixas viáveis de fabricação, mantendo os demais fixos nos valores de referência da Tabela 1. Adicionalmente, foram geradas combinações multivariadas para cobrir o espaço de projeto e fortalecer a base de dados.

Com o conjunto de dados consolidado, foi treinado um modelo preditivo MLP para mapear os parâmetros de entrada $\{a, g, s, t, C_L\}$ para a frequência de ressonância (f_r), a amplitude e a largura de banda (BW). As entradas e saídas foram normalizadas; o conjunto foi particionado em 80% para treinamento e 20% para validação. A arquitetura adotada (três camadas ocultas com funções de ativação *ReLU*). O treinamento utilizou otimizador *Adam* e função de perda quadrática média, com semente fixa para reprodutibilidade. O desempenho foi acompanhado por métricas de erro absoluto médio (MAE) e coeficiente de determinação (R^2), conforme prática usual em modelagem preditiva Goodfellow, Bengio e Courville (2016).

Na etapa de otimização, o MLP foi empregado como função substituta em um AG para busca de geometrias com resposta-alvo em frequência, amplitude e seletividade. As variáveis de decisão foram $\{a, g, s, t, C_L\}$, sujeitas aos mesmos limites do estudo paramétrico. A função de custo foi definida como combinação ponderada dos desvios absolutos em relação aos alvos de projeto, de forma a equilibrar a importância de f_r , amplitude e BW. O AG foi configurado com população de 500 indivíduos, 1000 gerações, cruzamento do tipo *blend* ($\alpha = 0,5$), mutação gaussiana e elitismo. A cada geração, os candidatos eram avaliados pelo MLP e, para as melhores soluções, procedeu-se à validação por simulação integral no *COMSOL Multiphysics*, fechando o ciclo de verificação do modelo substituto.

Por fim, com a geometria otimizada, foram repetidas as simulações para os quatro cenários de teste, permitindo a comparação direta entre previsões do MLP e resultados de campo completo e sustentando as análises subsequentes de sensibilidade e identificação dielétrica.

Resultados e discussão

A resposta espectral do sensor de referência evidenciou sensibilidade às variações do meio sob teste: observou-se deslocamento da frequência de mínima transmissão e alteração da atenuação conforme o estado do sistema (descarregado, vidro, contêiner vazio e água). Esses comportamentos confirmam o acoplamento dielétrico local e a seletividade da estrutura em campo próximo, conforme mostrado na Figura 3.

Visando melhorar seletividade e alinhar a frequência de operação à faixa de interesse, procedeu-se à otimização geométrica por AG utilizando o preditor MLP. Os valores finais obtidos para os parâmetros encontram-se na Tabela 2, constituindo a geometria adotada nas validações subsequentes.

Tabela 2: Parâmetros geométricos do sensor otimizado.

Parâmetro	Valor otimizado (mm)
a	7,45
g	0,37
s	0,38
t	0,29
C_L	9,81

Para aferir a consistência do modelo substituto, compararam-se as previsões do MLP com as simulações integrais no *COMSOL Multiphysics*; a boa concordância em frequência, amplitude e largura de banda confirma a robustez do preditor e respalda seu uso para

“Do conhecimento acadêmico à transformação sustentável: inovação com validação científica”

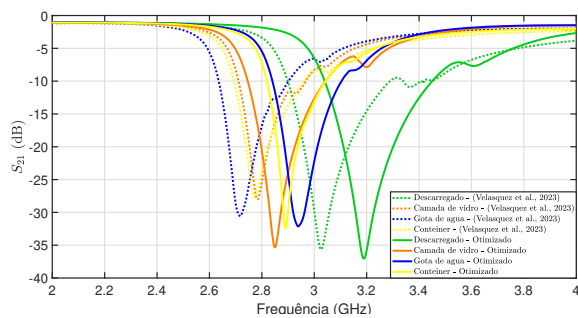
otimização (Tabela 3).

Tabela 3: Validação do sensor otimizado: comparação entre valores preditos (MLP) e simulados (COMSOL).

Métrica	MLP	COMSOL
Frequência (f_r) [GHz]	3,205	3,189
Amplitude (S_{21}) [dB]	-36,96	-37,041
Largura de banda (BW) [MHz]	58	51

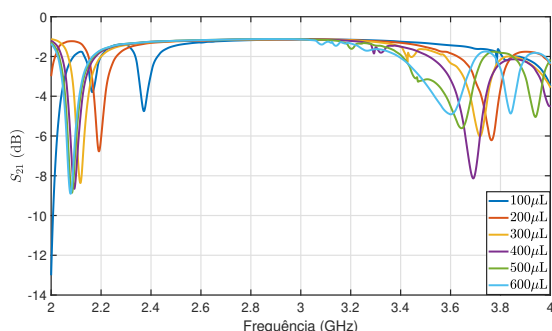
O comparativo direto entre o projeto de referência e a geometria otimizada evidencia um aumento de seletividade, com o vale de atenuação deslocado para a frequência de interesse e uma largura de banda mais estreita, mantendo o nível de atenuação como sintetizado na Figura 3.

Figura 3: Comparação do sensor e o sensor otimizado proposto.



Para estabelecer a condição de teste, realizou-se o estudo do volume da amostra em contêiner (diâmetro externo de 8,9 mm, diâmetro interno de 7,4 mm e altura de 10 mm). Verificou-se que, abaixo de 300 μL , ocorrem variações perceptíveis na posição do vale do coeficiente de transmissão S_{21} . Para volumes iguais ou superiores a 300 μL , a resposta apresenta comportamento mais consistente na região em torno de 2,1 GHz, embora ainda se observem divergências acima de 3,6 GHz. Por esse motivo, 300 μL foi adotado como volume de referência (Figura 4).

Figura 4: Variação de volume no contêiner.



Com o volume fixado, avaliou-se a sensibilidade do dispositivo à permissividade relativa, obtendo-se relação monotônica entre ϵ_r e a frequência de ressonância; a tendência experimental/simulada é sumarizada na Figura 5 e formalizada por ajuste polinomial de terceira ordem, cuja curva está na Figura 6 e expressão na Equação 1.

Figura 5: Variação da permissividade real.

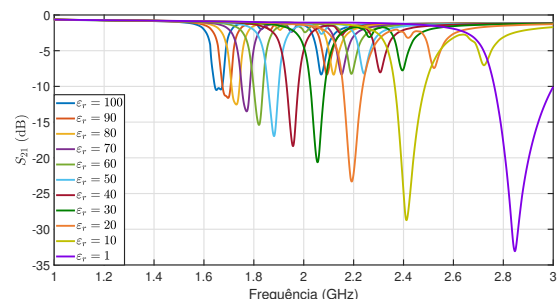
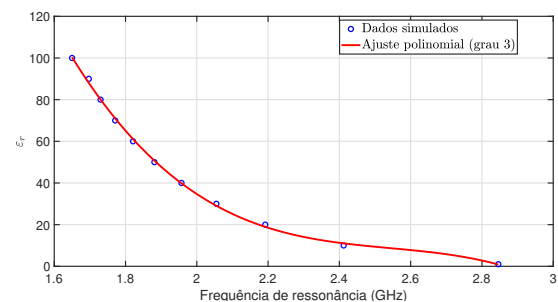


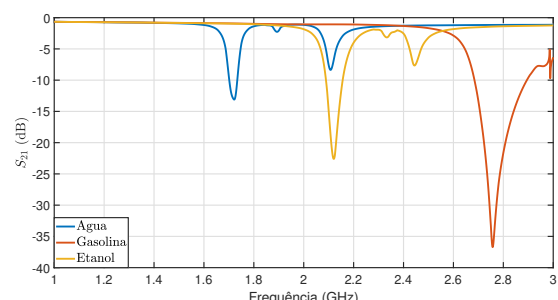
Figura 6: Curva de regressão.



$$\epsilon_r(f) = 109,2 f^3 + 1160,4 f^2 - 4126,5 f + 4918,3 \quad (1)$$

A identificação de líquidos por análise espectral foi então verificada com amostras de referência conforme Figura 7 e os valores estimados de ϵ_r pelo modelo polinomial são confrontados com os valores reais na Tabela 4. Os erros observados permanecem baixos e compatíveis com o nível de seletividade do sensor, corroborando a viabilidade para caracterização não invasiva.

Figura 7: Resposta do sensor para diferentes amostras líquidas.



“Do conhecimento acadêmico à transformação sustentável: inovação com validação científica”

Tabela 4: Comparação entre os valores reais e estimados de permissividade relativa.

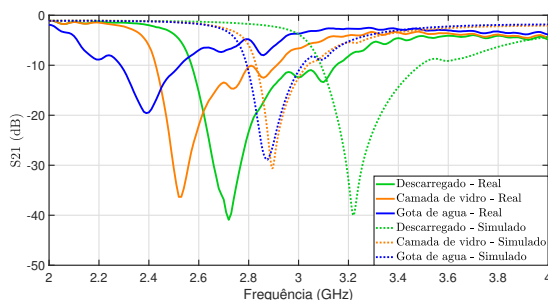
Amostra	ϵ_r Real	ϵ_r Estimado
Água destilada	81,0	79,5
Etanol	24,5	25,2
Gasolina	2,2	2,6

Por fim, foram realizados ensaios laboratoriais com o sensor descarregado, com a camada de vidro e com a aplicação de uma gota de água. O sensor foi fabricado de forma manual, conforme ilustrado na Figura 8. Os resultados obtidos experimentalmente foram então comparados com os dados simulados, como mostrado na Figura 9. Observa-se certa divergência entre os resultados experimentais e simulados, especialmente nas frequências dos vales, porém tal diferença não compromete a funcionalidade do sensor para sensoriamento.

Figura 8: Sensor construído manualmente.



Figura 9: Comparação sensor simulado vs real.



Conclusões

Com base nas simulações e na integração *MLP+AG*, demonstrou-se que a geometria otimizada do sensor aprimora a seletividade e o posicionamento espectral sem penalizar a atenuação do parâmetro S_{21} .

A resposta volumétrica em 300 μL e a curva $\epsilon_r(f)$ permitiram estimar a permissividade de líquidos com erro reduzido, validando a abordagem proposta para identificação não invasiva.

Nos ensaios experimentais, observou-se certa divergência entre os resultados simulados e os obtidos com o protótipo físico. Essa diferença é atribuída à necessidade de uma precisão de fabricação muito alta, inviável em processos manuais, o que indica que melhorias futuras na produção industrial podem reduzir tais discrepâncias.

Portanto, os resultados orientam a próxima etapa de fabricação e testes experimentais, confirmando a viabilidade do método e fornecendo informações importantes para ajustes de precisão.

Agradecimentos

Agradeço a Universidade Federal de Itajubá, ao programa PIBIC UNIFEI 2024/2025 pelo suporte financeiro, à equipe de professores que me orientou durante o processo, Diego Tami.

Referências

- AL-GBURI, A. J. A. et al. A miniaturized and highly sensitive microwave sensor based on csrr for characterization of liquid materials. *Materials*, MDPI, 2023.
- ELSHAFEY, M. A.; ABDALLA, M. A.; ELHENNAWY, H. M. A csrr-based planar sensor for dielectric characterization of liquids. *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, Wiley, 2021.
- GOODFELLOW, I.; BENGIO, Y.; COURVILLE, A. *Deep Learning*. [S.l.]: MIT Press, 2016.
- POZAR, D. M. *Microwave Engineering*. [S.l.]: Wiley, 2011.
- VELÁSQUEZ, R. J. et al. Microwave-based complementary split-ring resonator for the detection of variations in aqueous media. *IEEE Sensors Journal*, 2023.
- WU, T.; RAPPAPORT, T. S.; COLLINS, C. Near-field microwave sensing for material characterization: Fundamentals and applications. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, p. 2523–2534, 2015.