

Sensor de Micro-ondas Diferencial Baseado em Ressonadores Espirais Operando em Sub-6GHz

Differential Microwave Sensor Based on Spiral Resonators Operating in the Sub-6 GHz Band

¹Paulo Ricardo Pazetto Barbosa, ²Guilherme Lopes de Figueiredo Brandão, ³Pedro Luiz Lima Bertarini

¹Graduando em Engenharia Eletrônica e de Telecomunicações – Universidade Federal de Uberlândia – campus Patos de Minas (paulo.pazetto@ufu.br)

² Professor Associado à Faculdade de Engenharia Elétrica – Universidade Federal de Uberlândia - campus Patos de Minas (guilherme.brandao@ufu.br)

³ Professor Associado à Faculdade de Engenharia Elétrica – Universidade Federal de Uberlândia - campus Patos de Minas (bertarini@ufu.br)

RESUMO: O objetivo deste trabalho é apresentar o projeto e a validação, por meio de simulação computacional, de um sensor de micro-ondas diferencial para a caracterização da permissividade elétrica (ϵ_M) de materiais dielétricos na faixa sub-6 GHz. A topologia proposta baseia-se no Ressonador Espiral Modificado de Duas Voltas (M2TR-SR). A técnica diferencial emprega dois ressonadores acoplados, permitindo mitigar erros decorrentes de interferências ambientais não controladas e aumentar a confiabilidade analítica das medições. O dispositivo foi projetado no software Ansys HFSS para apresentar frequências de ressonância iniciais próximas a 4 GHz e 5 GHz. O desempenho da estrutura foi avaliado submetendo-a a materiais sob teste (MUT) com permissividades variando de 1 a 5, com foco em demonstrar a capacidade do dispositivo como um sensor de alta resolução. O mapeamento paramétrico revelou um pico de desempenho absoluto para $\epsilon_M = 2,0$, registrando uma Resolução de Detecção de Frequência (FDR) de 0,157 GHz (157 MHz) e uma sensibilidade (S_p) de 13,62%. Mesmo no limite superior testado ($\epsilon_M = 5,0$), o sensor demonstrou robustez contínua, sustentando um FDR de 0,090 GHz e sensibilidade de 7,81%. Regressões polinomiais comprovaram a alta previsibilidade matemática do sistema ($R^2 = 0,9865$). Desta forma, o dispositivo proposto constitui uma plataforma promissora para aplicações analíticas e industriais de sensoriamento não destrutivo.

Palavras-Chave: Constante Dielétrica. Medição Diferencial. Micro-ondas. Ressonador Espiral. Sensoriamento.

ABSTRACT: The objective of this work is to present the design and computational simulation validation of a differential microwave sensor for the characterization of the electrical permittivity (ϵ_M) of dielectric materials in the sub-6 GHz band. The proposed topology is based on the Modified Two-Turn Spiral Resonator (M2TR-SR). The differential technique employs two coupled resonators, mitigating errors caused by uncontrolled environmental interferences and increasing the analytical reliability of the measurements. The device was designed in Ansys HFSS software to present initial resonance frequencies near 4 GHz and 5 GHz. The structure's performance was evaluated by subjecting it to materials under test (MUT) with permittivities ranging from 1 to 5, aiming to demonstrate the device's capability as a high-resolution sensor. The parametric mapping revealed an absolute performance peak at $\epsilon_M = 2.0$, recording a Frequency Detection Resolution (FDR) of 0.157 GHz (157 MHz) and a sensitivity (S_p) of 13.62%. Even at the upper tested limit ($\epsilon_M = 5.0$), the sensor showed continuous robustness, sustaining an FDR of 0.090 GHz and a sensitivity of 7.81%. Polynomial regressions proved the system's high mathematical predictability ($R^2 = 0.9865$). Thus, the proposed device constitutes a promising platform for analytical and industrial nondestructive sensing applications.

Keywords: Dielectric Constant. Differential Measurement. Microwave. Sensing. Spiral Resonator.

Recebido em:
15/06/2026
Publicado em:
06/07/2026

1. INTRODUÇÃO

A medição precisa das propriedades dielétricas de materiais tem atraído significativo interesse de pesquisadores em diversas áreas. Sensores de micro-ondas têm sido amplamente utilizados para este propósito em aplicações biomédicas, como no monitoramento não invasivo dos níveis de glicose no sangue (YILMAZ; FOSTER; HAO, 2014; CHOI et al., 2015; GUARIN et al., 2015). Além disso, essas estruturas são aplicadas com sucesso no setor agrícola, para a medição da umidade do solo (KESHAVARZ et al., 2021), e na indústria química ou em sistemas microfluídicos, para a caracterização de amostras líquidas e medição da concentração de fluidos (ABDULJABAR; HAMZAH; PORCH, 2018; ALBISHI; RAMAHI, 2018; WU; ZHAO, 2023).

A utilização de sensores baseados em ressonadores de micro-ondas apresenta vantagens notáveis em comparação com métodos de medição tradicionais (como dispositivos ópticos ou térmicos) (FRADEN, 2004). Entre os principais benefícios destacam-se o baixo custo, a facilidade de fabricação, a flexibilidade de design e a capacidade de realizar medições em tempo real de forma não destrutiva e sem a necessidade de contato direto com o material sob teste (MUT - Material Under Test) (GUARIN et al., 2015; ABDOLRAZZAGHI; DANESHMAND; IYER, 2018). Estes sensores operam avaliando a permissividade elétrica relativa do MUT (ϵ_M) por meio de variações na frequência de ressonância ou na amplitude do sinal transmitido, fenômenos que ocorrem devido à interação dos campos eletromagnéticos marginais do sensor com a amostra (KESHAVARZ et al., 2021; ABDOLRAZZAGHI; DANESHMAND; IYER, 2018).

Apesar de suas vantagens, um dos principais desafios no uso de sensores de micro-ondas ressonantes é a sensibilidade cruzada. Fatores ambientais não controlados, como variações bruscas de temperatura, podem afetar o comportamento do MUT e gerar deslocamentos indesejados na frequência de ressonância, comprometendo a precisão das leituras (KESHAVARZ et al., 2021; ABDULJABAR; HAMZAH; PORCH, 2018). Para mitigar esses erros, técnicas de medição diferencial e otimizações topológicas têm sido propostas na literatura para aumentar de forma robusta a sensibilidade e a resolução dos dispositivos frente a variações dielétricas (KESHAVARZ et al., 2021; WU; ZHAO, 2023).

Neste contexto, o presente artigo tem como objetivo discutir a teoria de sensores de micro-ondas diferenciais aplicados na medição de permissividade elétrica, avaliando suas vantagens e desvantagens. É apresentada a topologia do sensor baseado em ressonadores espirais, simulado no software Ansys HFSS para a faixa de frequência sub-6 GHz e variando ϵ_M entre 1 e 5. Por meio deste estudo, obtêm-se os modelos matemáticos que descrevem a relação entre ϵ_M e os parâmetros de desempenho do sensor, caracterizando-o em termos de sensibilidade e resolução.

2. SENSORES DE MICRO-ONDAS E MEDIÇÃO DE PERMISSIVIDADE ELÉTRICA

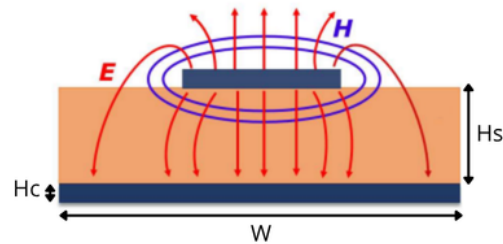
A medição da permissividade complexa de materiais utilizando sensores de micro-ondas ressonantes baseia-se na interação entre os campos eletromagnéticos na estrutura e no material sob teste. Esta seção detalha os princípios de operação, a evolução topológica focada em alta sensibilidade e as técnicas de mitigação de erros.

2.1 Princípio de Operação e Franjeamento de Campos

A operação de sensores planares em aplicações de sensoriamento dielétrico ocorre predominantemente na região de campo próximo. Ao introduzir um líquido ou sólido sobre a região sensível, os campos eletromagnéticos de franja (fringing fields) penetram no MUT

aumentando a permissividade elétrica efetiva (ϵ_{eff}) do meio como pode-se observar na Figura 1

Figura 1 – Distribuição de campos elétrico e magnético em uma linha de microfita genérica



Fonte: Ferreira (2022)

Como esquematizado na Figura 1, os campos elétricos (E, em vermelho) estendem-se desde a trilha condutora superior até o plano de terra, permeando tanto o substrato quanto a região de ar (ou material) logo acima. A intensidade e o alcance desses campos dependem da geometria do sensor, representada na figura pela largura da linha de microfita (W), pela espessura do substrato dielétrico (H_S) e pela espessura da camada de metalização de cobre (H_C). É precisamente na região onde ocorre o franjeamento desses campos eletromagnéticos para fora do substrato dielétrico que o MUT é posicionado, alterando o meio de propagação e, por consequência, a resposta ressonante do circuito. Para uma estrutura de microfita com o MUT posicionado em sua superfície, a permissividade elétrica efetiva pode ser definida analiticamente. Esse modelo matemático considera as propriedades dielétricas tanto do substrato dielétrico onde a microfita é posicionada quanto da amostra, além das dimensões físicas da linha de transmissão. Na condição em que $H_S \ll H_M$, a permissividade elétrica efetiva pode ser expressa pela Equação (1):

$$\epsilon_{eff} = \epsilon_0 \left(\frac{(\epsilon_S + \epsilon_M)}{2} + \frac{(\epsilon_S + \epsilon_M)}{2} + \frac{1}{\sqrt{1 + 12 \frac{H_S}{W_{MS}}}} \right) \quad (1)$$

Onde ϵ_0 corresponde à permissividade elétrica do vácuo e ϵ_S é a permissividade elétrica relativa do substrato do sensor. Esta formulação evidencia como a perturbação introduzida pelo material amostrado interage com as dimensões do dispositivo para alterar a constante dielétrica equivalente do sistema e, por consequência, a resposta em frequência do sensor (NIKKHAH et al., 2024). Macroscopicamente, o aumento de ϵ_{eff} se traduz em uma variação na capacitância equivalente (C_{eq}) e indutância equivalente (L_{eq}) da estrutura (ALIBAKHSHIKENARI et al., 2023). Estas variações de capacitância e indutância implicam em deslocamentos da frequência de ressonância (f_r), que pode ser descrita por (2):

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{eq}C_{eq}}} \quad (2)$$

Desta forma, um aumento na constante dielétrica do MUT eleva a relação $L_{eq}C_{eq}$, provocando um deslocamento para frequências mais baixas. O monitoramento deste deslocamento (Δf) na resposta espectral dos parâmetros de espalhamento do sensor permite a caracterização dielétrica precisa do material.

2.2 Técnica de Medição Diferencial e Erros

Apesar da alta sensibilidade alcançada pelas geometrias planares, esses dispositivos sofrem com o fenômeno da sensibilidade cruzada. A permissividade elétrica relativa de um material é dependente de variáveis ambientais não controladas, como temperatura e umidade

ambiente. Em um sensor absoluto comum, oscilações nesses fatores induzem deslocamentos de frequência parasitas, mascarando a leitura real do MUT (KESHAVARZ et al., 2021). Para isolar a resposta dielétrica autêntica, implementa-se a técnica de medição diferencial. Neste arranjo, utilizam-se duas estruturas ressonantes adjacentes (ou canais de leitura) submetidas rigorosamente ao mesmo ambiente físico. A medição final é extraída pela diferença entre as duas frequências ressonantes ($f_{r,DOWN}$ e $f_{r,UP}$). Dessa forma, o erro comum de perturbação ambiental (κ) imposto a ambas as células é cancelado algebricamente, conforme demonstrado em (3):

$$\Delta f_{diff} = (f_{r,UP} + \kappa) - (f_{r,DOWN} + \kappa) = f_{r,UP} - f_{r,DOWN} \quad (3)$$

Esta abordagem diferencial garante que as variações detectadas correspondam unicamente às mudanças nas propriedades intrínsecas da amostra, conferindo à topologia ressonante uma exatidão indispensável para medições laboratoriais e industriais (MOHAMMADI; ZARIFI, 2020).

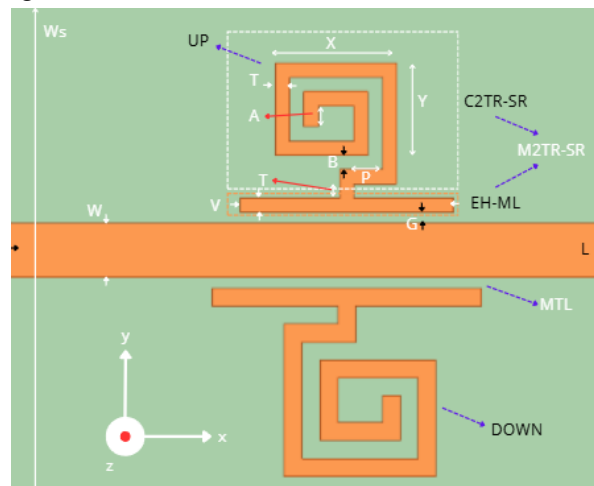
3. TOPOLOGIA PROPOSTA E PARÂMETROS DE DESEMPENHO

Nesta seção, apresenta-se detalhadamente a topologia do sensor de micro-ondas diferencial adotada, baseada no design de alta sensibilidade proposto em NIKKHAH et al. (2024), bem como a definição dos parâmetros utilizados na análise de desempenho da estrutura.

3.1 Topologia M2TR-SR

O sensor proposto neste trabalho baseia-se no Ressonador Espiral de Duas Voltas Modificado com Anel Fendido (M2TR-SR - Modified Two-Turn Resonator Split Ring Resonator), apresentado em NIKKHAH et al. (2024). O design completo, ilustrado na Figura 2, consiste em uma linha de microfita de 50Ω cujos campos eletromagnéticos de franja interagem com dois ressonadores: M2TR-SR UP (ressonador superior) e M2TR-SR DOWN (ressonador inferior), que operam em frequência de ressonância distintas.

Figura 2 – Topologia do sensor diferencial com linha de microfita e ressonadores espirais.



Diferentemente de ressonadores espirais convencionais ou SRRs simples, o M2TR-SR é projetado para maximizar a densidade de campo elétrico em áreas específicas, aumentando a sensibilidade cruzada do sensor a variações dielétricas do MUT (EBRAHIMI et al., 2014). Conforme a teoria de projeto detalhada em NIKKHAH et al. (2024), esta topologia aprimorada é obtida através de duas características fundamentais:

1. Estrutura Espiral: A configuração de duas voltas aumenta a indutância total (L_{eq}) em uma área compacta, reduzindo a frequência de operação sem aumentar o tamanho do

dispositivo, o que corrobora com os princípios de designs compactos discutidos em OMER et al. (2021).

2. Espaçamento entre as Espiras: A introdução de fendas (gaps) entre os espirais e a linha de microfita interrompe o fluxo de corrente, concentrando o campo elétrico nessas regiões e adicionando capacitância ao circuito equivalente. Essa combinação dos anéis juntamente à linha de microfita provoca o efeito ressonante desejado, possibilitando um dispositivo mais sensível às variações de permissividade elétrica.

Essa combinação dos anéis juntamente à linha de microfita provoca o efeito ressonante desejado, possibilitando um dispositivo mais sensível às variações de permissividade elétrica.

3.2 Considerações de projeto

Neste trabalho, as dimensões geométricas do sensor foram redefinidas para que este apresentasse frequências de ressonância próximas a 4 e 5GHz a vácuo ($\epsilon_M = 1$ e espessura $H_M = 2\text{mm}$). Considerou-se que o substrato dielétrico utilizado como base para o sensor foi o Rogers RO4003C ($\epsilon_r = 3,55$, $\tan \delta = 0,0027$) de $25 \times 40\text{mm}^2$ com espessura $H_S = 0,508\text{mm}$. Para o design proposto neste artigo, utilizou-se uma espessura de cobre $H_C = 35\mu\text{m}$, um padrão adotado na fabricação de placas de circuito impresso (PCBs) de alta frequência. A Tabela I apresenta as dimensões finais adotadas para o sensor proposto neste trabalho.

Tabela I – Dimensões geométricas dos ressonadores M2TR-SR.

Símbolo	Dimensão UP x DOWN (mm)
X	3,34 x 4,2
Y	2,56 x 3,21
T	0,39 x 0,49
A	0,59 x 0,74
B	0,39 x 0,49
V	5,9 x 7,42
P	0,78 x 0,98
L	40
W	1,5
G	0,3

3.3 Desempenho do Sensor: Resolução e Sensibilidade

Para quantificar o desempenho da topologia diferencial proposta, adotam-se duas figuras de mérito consolidado na literatura (NIKKHAH et al., 2024): a Resolução de Detecção de Frequência (FDR - Frequency Detection Resolution) e a Sensibilidade Proposta (S_p). Em aplicações de sensores de micro-ondas, estes parâmetros são importantes para avaliar o quanto o sensor é susceptível a identificar pequenas alterações no meio. A FDR indica a taxa de variação do deslocamento de frequência em relação à variação da permissividade do material. Na técnica diferencial, ela é definida pela Equação (4):

$$FDR = \frac{D_p}{\Delta\epsilon_r} = \frac{|\Delta f_{MUT} - \Delta f_{ar}|}{\epsilon_M - 1} \quad (4)$$

Onde Δf_{MUT} é a diferença de frequência de ressonância entre os ressonadores com a amostra, Δf_{ar} é a diferença de frequência de referência (sensor a vácuo, $\epsilon_M = 1,0$) e $\Delta\epsilon_r$ é a variação da constante dielétrica absoluta. Por sua vez, a Sensibilidade (S_p) fornece uma métrica percentual normalizada do desempenho do sensor, tornando a avaliação independente da frequência de operação absoluta, sendo calculada pela Equação (5):

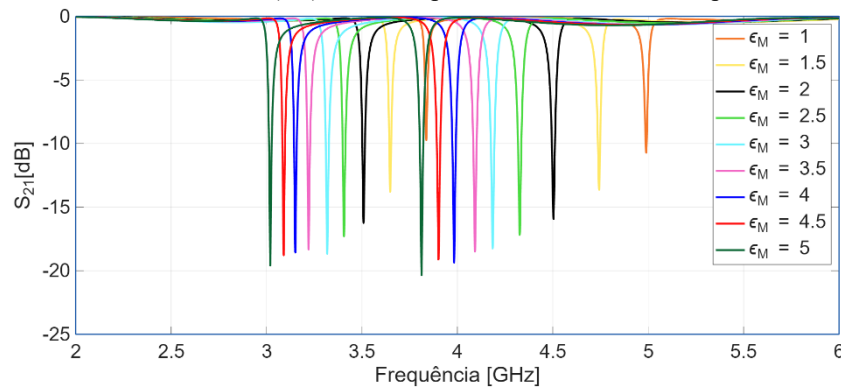
$$S_p = \frac{FDR}{\Delta f_{ar}} \times 100 \quad (5)$$

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para validar a topologia proposta e avaliar o desempenho do sensor na faixa de 2 a 6GHz, simulações paramétricas foram executadas no software Ansys HFSS. Nestas simulações, foram avaliados materiais com permissividade ϵ_M entre 1 e 5, que abrange valores típicos de substratos dielétricos convencionais como, por exemplo, o FR-4 ($\epsilon_M = 4,3$) e o Rogers 5880 ($\epsilon_M = 2,2$).

A Figura 3 apresenta os resultados simulados do módulo do coeficiente de transmissão (S_{21}) do sensor, em dB, para diferentes valores de ϵ_M , considerando a faixa de frequências de 2 a 6GHz.

Figura 3 – Coeficiente de transmissão (S_{21}) simulado para diferentes valores de permissividade elétrica ϵ_M .



Conforme observado na Figura 3, o espectro de transmissão exibe duas frequências de ressonância distintas (vales de atenuação profunda) para cada permissividade do MUT avaliada. Na configuração diferencial adotada, o ressonador na parte superior da linha (célula UP) produziu ressonâncias em frequências maiores, enquanto o ressonador na parte inferior (célula DOWN) apresentou ressonância em frequências menores, como esperado avaliando a teoria de ressonadores (KESHAVARZ et al., 2021).

A Tabela II sumariza as frequências de ressonância extraídas das simulações para ambas as células, apresenta o cálculo da diferença de frequência ($\Delta f_{MUT} = f_{r,UP} - f_{r,DOWN}$), e os parâmetros de desempenho do sensor.

Tabela II – Frequências de ressonância, variação diferencial e parâmetros de desempenho simulados.

ϵ_M	$f_{r,UP}(GHz)$	$f_{r,DOWN}(GHz)$	$\Delta f_{MUT}(GHz)$	$FDR (GHz)$	$S_p(\%)$
1 (A Vazio)	4,99	3,837	1,153	-	-
1,5	4,743	3,648	1,095	0,116	10,061
2,0	4,504	3,508	0,996	0,157	13,617
2,5	4,327	3,406	0,921	0,155	13,414
3,0	4,185	3,318	0,867	0,143	12,402
3,5	4,092	3,220	0,872	0,113	9,748
4,0	3,983	3,150	0,833	0,107	9,251
4,5	3,901	3,090	0,811	0,098	8,475
5,0	3,812	3,019	0,793	0,090	7,806

A análise da Tabela II revela que o sensor apresenta comportamento espectral sensível à variação da permissividade ϵ_M dentro das faixas de frequência e permissividade avaliadas. Observa-se que, ao variar a permissividade de $\epsilon_M = 1$ (ar) para $\epsilon_M = 5$, o deslocamento diferencial (Δf_{MUT}) sofre uma redução expressiva de 360MHz, passando de 1,153GHz para

0,793GHz. Os parâmetros de desempenho comprovam a elevada resolução da estrutura: a sensibilidade (S_p) atinge seu valor máximo de 13,617% para $\epsilon_M = 2$, acompanhada de uma FDR de 0,157GHz (157MHz). Mesmo no limite superior da faixa analisada ($\epsilon_M = 5$), o sensor mantém uma sensibilidade relevante de 7,806% e um FDR de 0,090GHz (90MHz). Esse decaimento não linear da sensibilidade com o aumento da permissividade corrobora a teoria de ressonadores de micro-ondas, validando a eficácia da técnica diferencial proposta para caracterizações dielétricas (KESHAVARZ et al., 2021).

Para ilustrar o comportamento destas métricas de desempenho, as Figuras 4 e 5 apresentam, respectivamente, os valores de FDR (em GHz) e S_p (%) em função da permissividade ϵ_M , variando de 1,5 a 5, bem como a curva estimada por regressão polinomial para cada parâmetro.

Figura 4 – Resolução de Detecção de Frequência (FDR) em função da permissividade.

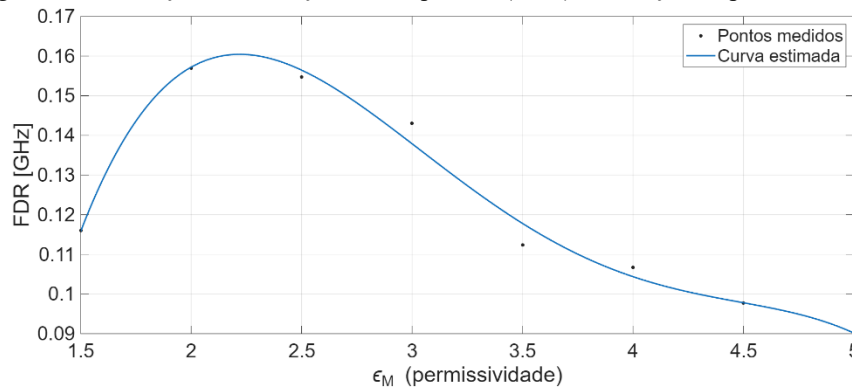
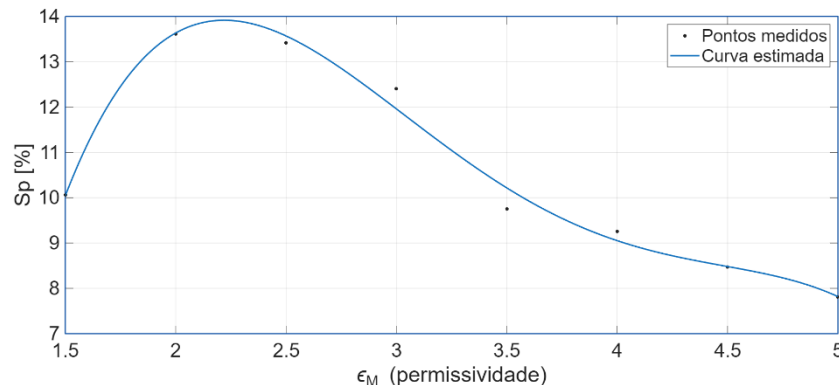


Figura 5 – Sensibilidade do sensor (S_p) em função da permissividade.



Conforme observado nas Figuras 4 e 5, o sensor exibe um comportamento consistente e de alta resolução na faixa de permissividade analisada. As curvas demonstram um incremento inicial de desempenho, atingindo seu ponto de máximo absoluto em $\epsilon_M = 2,0$. A partir desta permissividade, ambas as métricas apresentam um decaimento contínuo e não linear à medida que ϵ_M aumenta em direção a 5,0. Esse comportamento é característico de detectores ressonantes de microondas, sendo atribuído à saturação gradual da interação capacitiva entre os campos eletromagnéticos franjantes e o MUT (FERREIRA, 2022). Para quantificar e prever essa resposta de forma analítica, regressões polinomiais de quarta ordem foram aplicadas aos dados, resultando nas Equações (6) e (7) para o FDR e a S_p , respectivamente:

$$FDR(\epsilon_M) = -0,0003\epsilon_M^4 + 0,0088\epsilon_M^3 - 0,0814\epsilon_M^2 + 0,304\epsilon_M - 0,2311 \quad (6)$$

$$S_p(\epsilon_M) = -0,4661\epsilon_M^4 + 7,0092\epsilon_M^3 - 38,064\epsilon_M^2 + 85,765\epsilon_M - 54,257 \quad (7)$$

Ambos os modelos matemáticos desenvolvidos apresentam um coeficiente de determinação (R^2) de 0,9865, indicando que as curvas de ajuste polinomial de quarta ordem representam com boa concordância o comportamento não linear dos parâmetros. Apesar do

decaimento natural na sensibilidade para maiores permissividades, a estrutura mantém um desempenho de detecção robusto ao longo de toda a faixa investigada. Em comparação com topologias planares simples de elemento único, que apresentam sensibilidades da ordem de 3 à 5% (YEO; LEE, 2019; EBRAHIMI; SCOTT; GHORBANI, 2018a,b; KAPOOR; VARSHNEY; AKHTAR, 2020), essa capacidade dos sensores diferenciais de manter níveis consideráveis de desempenho para variações dielétricas é notável (NIKKHAH et al., 2024). Tais resultados atestam a excelência da topologia diferencial M2TR-SR, validando-a como uma plataforma confiável para caracterização de materiais dielétricos.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este trabalho apresentou o design e a validação em ambiente de simulação eletromagnética de um sensor de microondas diferencial de alta sensibilidade, baseado na topologia M2TR-SR, otimizado para operar na faixa de frequência de 2 a 6GHz. A fundamentação teórica e as simulações confirmaram que a adoção de ressonadores espirais modificados amplia o confinamento dos campos eletromagnéticos de franja, garantindo uma elevada sensibilidade à estrutura. Adicionalmente, a implementação da técnica diferencial demonstrou ser uma solução robusta para mitigar erros oriundos de fatores ambientais indesejados, assegurando alta confiabilidade analítica.

As simulações paramétricas revelaram uma correlação não linear bem definida entre a variação da constante dielétrica do material sob teste e o deslocamento da frequência diferencial (Δf_{MUT}). Na faixa de permissividade avaliada (de $\epsilon_M = 1$ a 5), voltada à detecção de pequenas perturbações dielétricas, o deslocamento diferencial sofreu uma expressiva variação total de 360MHz. A avaliação quantitativa do desempenho evidenciou métricas notáveis, com o sensor atingindo o seu ponto de máximo desempenho na permissividade $\epsilon_M = 2,0$, registrando uma Sensibilidade (S_p) de 13,62% e uma FDR de 157MHz. Mesmo no limite superior da análise ($\epsilon_M = 5,0$), a estrutura sustentou níveis elevados de desempenho (FDR de 90MHz e S_p de 7,81%). Ademais, o comportamento do dispositivo pôde ser modelado analiticamente por regressões polinomiais de quarta ordem, alcançando um coeficiente de determinação R^2 de 0,9865.

Estes resultados atestam a viabilidade técnica da topologia M2TR-SR como uma plataforma promissora para o sensoriamento não destrutivo em aplicações diversas como industriais, 5 químicas e laboratoriais de precisão. Como trabalhos futuros, sugere-se a fabricação física do protótipo, a realização de medições experimentais em bancada utilizando um Analisador de Redes Vetoriais (VNA) e a calibração contínua do sistema com amostras reais de diferentes materiais dielétricos de baixas perdas, a fim de consolidar experimentalmente os modelos de predição desenvolvidos neste estudo.

6. REFERÊNCIAS

YILMAZ, T.; FOSTER, R.; HAO, Y. Towards accurate dielectric property retrieval of biological tissues for blood glucose monitoring. **IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques**, v. 62, n. 12, p. 3193-3204, 2014.

CHOI, H. et al. Design and in vitro interference test of microwave noninvasive blood glucose monitoring sensor. **IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques**, v. 63, n. 10, p. 3016-3025, 2015.

GUARIN, G. et al. Miniature microwave biosensors: Noninvasive applications. **IEEE Microwave Magazine**, v. 16, n. 4, p. 71-86, 2015.

KESHAVARZ, R.; LIPMAN, J.; SCHREURS, D. M. M.-P.; SHARIATI, N. Highly sensitive differential microwave sensor for soil moisture measurement. **IEEE Sensors Journal**, v. 21, n. 24, p. 27458-27464, 2021.

ABDULJABAR, A. A.; HAMZAH, H.; PORCH, A. Double microstrip microfluidic sensor for temperature correction of liquid characterization. **IEEE Microwave and Wireless Components Letters**, v. 28, n. 8, p. 735-737, 2018.

ALBISHI, A. M.; RAMAHI, O. M. Highly sensitive microwaves sensors for fluid concentration measurements. **IEEE Microwave and Wireless Components Letters**, v. 28, n. 4, p. 287-289, 2018.

WU, W.-J.; ZHAO, W.-S. A differential THz/MW sensor for characterizing liquid samples based on CSRs. **IEEE Sensors Journal**, v. 23, n. 10, p. 10429-10436, 2023.

FRADEN, J. **Handbook of Modern Sensors: Physics, Design, and Applications**. 3 ed. New York, NY, USA: Springer, 2004.

ABDOLRAZZAGHI, M.; DANESHMAND, M.; IYER, A. K. Strongly enhanced sensitivity in planar microwave sensors based on metamaterial coupling. **IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques**, v. 66, n. 4, p. 1843- 1855, 2018.

FERREIRA, M. L. **Sensor de micro-ondas não-invasivo para monitoramento de índice glicêmico em pacientes diabéticos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), 117f. Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2022.

NIKKHAH, N. et al. Highly sensitive differential microwave sensor using enhanced spiral resonators for precision permittivity measurement. **IEEE Sensors Journal**, v. 24, n. 9, p. 14177-14188, 2024.

ALIBAKHSHIKENARI, M. et al. Design of a planar sensor based on split-ring resonators for non-invasive permittivity measurement. **Sensors**, v. 23, n. 11, p. 5306, 2023.

MOHAMMADI, S.; ZARIFI, M. H. Differential microwave resonator sensor for real-time monitoring of volatile organic compounds. **IEEE Sensors Journal**, v. 21, n. 5, p. 6105- 6114, 2020.

EBRAHIMI, A.; WITHAYACHUMNANKUL, W.; ALSARAWI, S.; ABBOTT, D. High-sensitivity metamaterialinspired sensor for microfluidic dielectric characterization. **IEEE Sensors Journal**, v. 14, n. 5, p. 1345-1351, 2014.

OMER, A. E. et al. Multiple-cell microfluidic dielectric resonator for liquid sensing applications. **IEEE Sensors Journal**, v. 21, n. 5, p. 6094-6104, 2021.

YEO, J.; LEE, J. High-sensitivity microwave sensor based on an interdigital-capacitor-shaped defected ground structure for permittivity characterization. **Sensors**, v. 19, n. 498, 2019.

EBRAHIMI, A.; SCOTT, J.; GHORBANI, K. Differential sensors using microstrip lines loaded with two split-ring resonators. **IEEE Sensors Journal**, v. 18, n. 14, p. 5786- 5793, 2018.

EBRAHIMI, A.; SCOTT, J.; GHORBANI, K. Transmission lines terminated with LC resonators for differential permittivity sensing. **IEEE Microwave and Wireless Components Letters**, v. 28, n. 12, p. 1149-1151, 2018.

KAPOOR, A.; VARSHNEY, P. K.; AKHTAR, M. J. Interdigital capacitor loaded electric-LC resonator for dielectric characterization. **Microwave and Optical Technology Letters**, v. 62, n. 9, p. 2835-2840, 2020.

NOTAS

CONTRIBUIÇÃO DE AUTORIA

Concepção e elaboração do manuscrito: P. Pazetto, G. L. F. Brandão, P. Bertarini

Coleta de dados: P. Pazetto, G. L. F. Brandão

Análise de dados: P. Pazetto, G. L. F. Brandão

Discussão dos resultados: P. Pazetto, G. L. F. Brandão, P. Bertarini

Revisão e aprovação: P. Pazetto, G. L. F. Brandão, P. Bertarini

PREPRINTS

O manuscrito não é um preprint.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho não teria atingido seus objetivos sem o suporte fundamental do CNPq e da FAPEMIG, aos quais prestamos nossos sinceros agradecimentos por todo o fomento e disponibilidade ao longo do projeto. Agradecemos imensamente à Conferência de Estudos em Engenharia Elétrica (CEEL) pela honra de figurar entre os dez melhores artigos do evento, conquista que culminou no convite para integrar as páginas da Revista Eletrônica ES Engineering and Science, à qual também agradecemos a excelência e oportunidade de publicação.

CONFLITO DE INTERESSES

Os autores declaram não haver conflito de interesses.

DISPONIBILIDADE DE DADOS DE PESQUISA E OUTROS MATERIAIS

Os dados foram publicados no próprio artigo. Todo o conjunto de dados que dá suporte aos resultados deste estudo está incluído no corpo do artigo.

ANUÊNCIA DE AVALIAÇÃO ABERTA

Não se aplica.



O conteúdo deste trabalho pode ser usado sob os termos da licença Creative Commons Attribution 4.0. Qualquer outra distribuição deste trabalho deve manter a atribuição ao(s) autor(es) e o título do trabalho, citação da revista e DOI.