

SÍNTESE E ANÁLISE DE MATERIAIS ELETROMAGNÉTICOS APLICADOS À ANTENAS DE MICROFITA

Lívia Cabral Maia¹, Idalmir de Souza Queiroz Jr.²

Resumo: Este estudo investiga a síntese, caracterização e eficiência de compósitos formados por ferrita de níquel e ferrita de cobalto, ambos adicionados de cobre metálico, com foco na aplicação em antenas de microfita que operam na faixa de frequência de 7 a 8,5 GHz. A pesquisa explora as rotas de produção desses compósitos por meio do método de coprecipitação, seguido de tratamentos térmicos controlados para garantir a obtenção de materiais com microestrutura adequada. Além da síntese, são realizadas análises das propriedades eletromagnéticas, incluindo a permissividade elétrica e a tangente de perda dielétrica, parâmetros fundamentais para o desempenho e a eficiência das antenas. O estudo também busca compreender como a adição do cobre influencia a resposta eletromagnética dos compósitos e os resultados visam avaliar o potencial de uso desses materiais em dispositivos de telecomunicações de alta performance. Dessa forma, a pesquisa contribui para o desenvolvimento de novas soluções para sistemas modernos de comunicação sem fio, ampliando as possibilidades de aplicação de ferritas em tecnologias emergentes.

Palavras-chave: Compósitos de Ferrita, Caracterizações Dielétricas, Ressonador Dielétrico.

1. INTRODUÇÃO

No último século, a demanda por antenas de frequência de micro-ondas foi impulsionada pela crescente necessidade de sistemas de comunicação sem fio. O desenvolvimento de antenas com alta eficiência e propriedades eletromagnéticas aprimoradas está se tornando cada vez mais essencial para comunicações sem fio de alta qualidade.

Entre os materiais usados na construção de antenas, as ferritas são amplamente aplicadas devido às suas propriedades eletromagnéticas, incluindo a baixa perda e a estabilidade térmica. Neste caso, a ferrita de níquel (NiFe_2O_4) e a ferrita de cobalto (CoFe_2O_4) apresentam características magnéticas e dielétricas favoráveis em frequências de micro-ondas. O uso de cobre metálico com ferritas tem o potencial de melhorar a eficiência geral das antenas.

A síntese de ferrita de níquel e ferrita de cobalto pelo método de coprecipitação é um processo amplamente utilizado na produção de materiais magnéticos. Esse método envolve a dissolução de sais metálicos de níquel e cobalto em uma solução aquosa, contendo íons de ferro. Um agente precipitante, como hidróxido de sódio (NaOH), é adicionado para ajustar o pH da solução, promovendo a precipitação conjunta (co-precipitação) dos cátions metálicos na forma de hidróxidos.

O precipitado é então coletado e submetido a uma calcinação, onde o material é aquecido em temperaturas elevadas para promover a formação da estrutura cristalina desejada e converter os hidróxidos em ferritas. Esse método é vantajoso por permitir o controle da composição química e da distribuição de partículas, resultando em ferritas com propriedades magnéticas específicas que podem ser ajustadas para aplicações em dispositivos eletromagnéticos, como as antenas.

A aplicação e análise de materiais eletromagnéticos em antenas de microfita é fundamental devido a necessidade de otimização dos dispositivos que o avanço da tecnologia demanda. Algumas características são elementares, que podem ser mais eficientes quando modificados e analisados os materiais aplicados. Eles podem ajudar a concentrar o campo eletromagnético, por exemplo, reduzindo perdas e aumentando a capacidade de transmissão e recepção de sinais.

2. DESENVOLVIMENTO

2.1. Referencial Teórico

2.1.1. Compósitos de Ferrita

Os compósitos de ferrita são materiais cerâmicos magnéticos que se destacam por suas excelentes propriedades eletromagnéticas, sendo amplamente empregados em diversas aplicações tecnológicas, especialmente em dispositivos que operam na faixa de micro-ondas. Esses materiais combinam alta permeabilidade magnética, baixa condutividade elétrica e boas propriedades dielétricas, o que os torna ideais para antenas, absorvedores de micro-ondas e blindagem eletromagnética. As ferritas podem ser divididas em três classes principais: ferritas de espinélio, ferritas hexagonais e ferritas granadas. Dentre essas, as ferritas de espinélio, como a ferrita de níquel (NiFe_2O_4) e a ferrita de cobalto (CoFe_2O_4), são especialmente relevantes por apresentarem alta estabilidade térmica, elevada resistividade elétrica e boas características magnéticas em altas frequências [1].

A adição de metais, como o cobre, a essas ferritas pode modificar suas propriedades estruturais e magnéticas, otimizando o desempenho dos compósitos em faixas específicas de frequência. Além disso, a combinação de ferritas com matrizes poliméricas ou cerâmicas forma compostos que aliam leveza, resistência mecânica e desempenho eletromagnético, possibilitando a miniaturização de dispositivos e a melhoria da eficiência de antenas.[2] Um fator essencial para o uso de ferritas em micro-ondas é a sua permissividade relativa (ϵ_r), que indica a capacidade do material de armazenar energia elétrica de campo eletromagnético. A permissividade influencia diretamente a capacidade do material em guiar e concentrar campos elétricos, impactando o comportamento de antenas e filtros. Portanto, o estudo detalhado da permissividade dos compósitos de ferrita é fundamental para aplicações avançadas em telecomunicações e sensores [3].

2.1.2. Caracterizações Dielétricas

A caracterização dielétrica é um passo crucial na avaliação de materiais destinados a aplicações em micro-ondas, pois permite compreender como o material interage com campos elétricos e magnéticos em diferentes faixas de frequência. Entre as propriedades dielétricas mais importantes, destacam-se a permissividade relativa (ϵ_r) e a tangente de perda dielétrica ($\tan \delta$). [4] A permissividade relativa, além de indicar a capacidade do material em armazenar energia elétrica, está diretamente relacionada à eficiência com que o material pode concentrar campos eletromagnéticos, sendo um parâmetro vital na definição da frequência de ressonância e da largura de banda de antenas e ressoadores. Já a tangente de perda dielétrica ($\tan \delta$) representa a quantidade de energia elétrica dissipada na forma de calor dentro do material quando submetido a um campo alternado; ou seja, quanto menor o $\tan \delta$, menores as perdas, o que se traduz em maior eficiência do dispositivo [5].

Esses parâmetros dielétricos não são constantes em todas as faixas de frequência, pois variam de acordo com o comportamento de polarização do material. Em frequências mais altas, como as utilizadas em micro-ondas, a capacidade dos dipolos do material de acompanhar o campo elétrico alternado diminui, o que pode reduzir a permissividade e, simultaneamente, aumentar a tangente de perda, devido à dificuldade de alinhamento das cargas internas. Assim, a relação entre permissividade, tangente de perda e frequência deve ser cuidadosamente avaliada para garantir o bom desempenho dos dispositivos. Para a obtenção desses parâmetros, técnicas como a cavidade ressonante, a linha de transmissão e o método coaxial são frequentemente utilizadas, permitindo medições precisas em diferentes faixas de frequência [6].

2.1.3. Ressonadores Dielétricos

Ressonadores dielétricos são dispositivos fundamentais em sistemas de micro-ondas, amplamente empregados para melhorar a eficiência e o desempenho das antenas. Eles são, em geral, constituídos por materiais dielétricos de alta permissividade relativa, o que permite reduzir as dimensões do dispositivo sem comprometer a eficiência. A alta permissividade favorece a concentração do campo elétrico no interior do ressonador, proporcionando uma resposta ressonante mais intensa e seletiva. Além disso, a tangente de perda dielétrica ($\tan \delta$) precisa ser suficientemente baixa para garantir que as perdas por dissipação de energia sejam mínimas, assegurando alta eficiência de radiação [7].

A inclusão de ferritas, como a ferrita de níquel ou de cobalto adicionadas de cobre, em ressoadores dielétricos oferece vantagens adicionais, como a possibilidade de sintonização das frequências de operação por meio de controle externo, por exemplo, com a aplicação de campos magnéticos. Isso permite a criação de antenas inteligentes, que podem adaptar sua frequência de operação conforme a necessidade. A relação entre a permissividade do material e a frequência é determinante para o ajuste fino das bandas de operação dos ressoadores. A capacidade de manipular essas propriedades permite o desenvolvimento de dispositivos mais

2.1.4. Método de Co-precipitação

O método de co-precipitação é uma técnica amplamente utilizada para a síntese de ferritas devido à sua simplicidade, baixo custo e excelente controle sobre a composição química e o tamanho das partículas.[9] Esse processo consiste na dissolução de sais metálicos precursores em meio aquoso, seguida da adição de um agente precipitante, como hidróxido de sódio ou amônia, que promove a formação do precipitado contendo os íons metálicos desejados [10]. Uma das principais vantagens dessa técnica é a obtenção de nanopartículas com alta pureza e homogeneidade, fundamentais para garantir boas propriedades magnéticas e dielétricas dos materiais finais.

Após a síntese, o material passa por etapas de lavagem, secagem, calcinação e sinterização, processos que ajustam a estrutura cristalina e as propriedades físicas do composto. A microestrutura final influencia diretamente a permissividade e a tangente de perda dielétrica do material, afetando seu desempenho em altas frequências. O tamanho das partículas e a homogeneidade da composição impactam o comportamento dos dipolos internos frente ao campo alternado, afetando tanto a armazenagem de energia (ϵ_r) quanto as perdas ($\tan \delta$). Por isso, o controle cuidadoso do processo de co-precipitação é essencial para produzir materiais otimizados para aplicações em micro-ondas, como antenas de microfita e absorvedores de radiação [11]. Dessa maneira, a escolha do método de síntese e o ajuste preciso das condições reacionais são determinantes para o sucesso na aplicação final dos compósitos de ferrita em dispositivos de alta frequência [12].

2.2. Materiais e Métodos

Para o primeiro material, a síntese foi realizada utilizando nitrato de ferro ($\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$), 98%, e nitrato de níquel ($\text{Ni}(\text{NO}_3)_2$), 98%, como precursores. O processo de coprecipitação consistiu em dissolver os nitratos em ácido acético a 2%, contendo $1,17 \times 10^{-3}$ kg de quitosana, 90%, por 24 horas (solução 1), seguido da neutralização da solução com hidróxido de sódio e água destilada (0,5 L para cada 90×10^{-3} kg) a 70 °C (solução 2).

A adição da solução 1 à solução 2, gota a gota, resultou na formação de precipitados, que foram separados por filtração, como mostrado na fig. 1, e secos em estufa a 150 °C por 24 horas. Após a secagem, o material foi calcinado em uma mufla a 700 °C por 2 horas. Após a calcinação, a ferrita de níquel (NiFe_2O_4) foi macerada para possibilitar sua aplicação e prensagem.



Fig. 1 - Precipitados resultantes da síntese no processo de filtração. (Arquivo Pessoal)

O segundo material foi obtido pelos mesmos métodos descritos acima para o primeiro material, com a única diferença sendo a substituição do nitrato de níquel pelo nitrato de cobalto ($\text{Co}(\text{NO}_3)_2$), 98%, resultando na formação de ferrita de cobalto (CoFe_2O_4). Ambas representadas na figura 2 a seguir.



Fig. 2 - Ferrita de Cobalto, de cor negra, e Ferrita de Níquel, de cor marrom, obtidas. (Arquivo Pessoal)

O terceiro material utilizado foi cobre metálico, 99%. Os ressoadores produzidos para análise são constituídos pelas equações 1, 2, 3 e 4.



Cada compósito foi rotulado como: Ni para a ferrita de níquel pura, 10Co para a ferrita de níquel com 10% de ferrita de cobalto, 10Cu para a ferrita de níquel com 10% de cobre metálico e 10CoCu para a ferrita de níquel com 10% de cobre metálico mais 10% de ferrita de cobalto, respectivamente, de acordo com as composições e sequências das equações. Os compósitos propostos foram prensados com 7 toneladas em um molde de 20 mm de diâmetro. Após a prensagem, os ressoadores foram sinterizados na mesma temperatura e tempo de calcinação do respectivo material, ou seja, 700 °C por 2 horas. Na figura 3 é apresentado o fluxograma da produção.

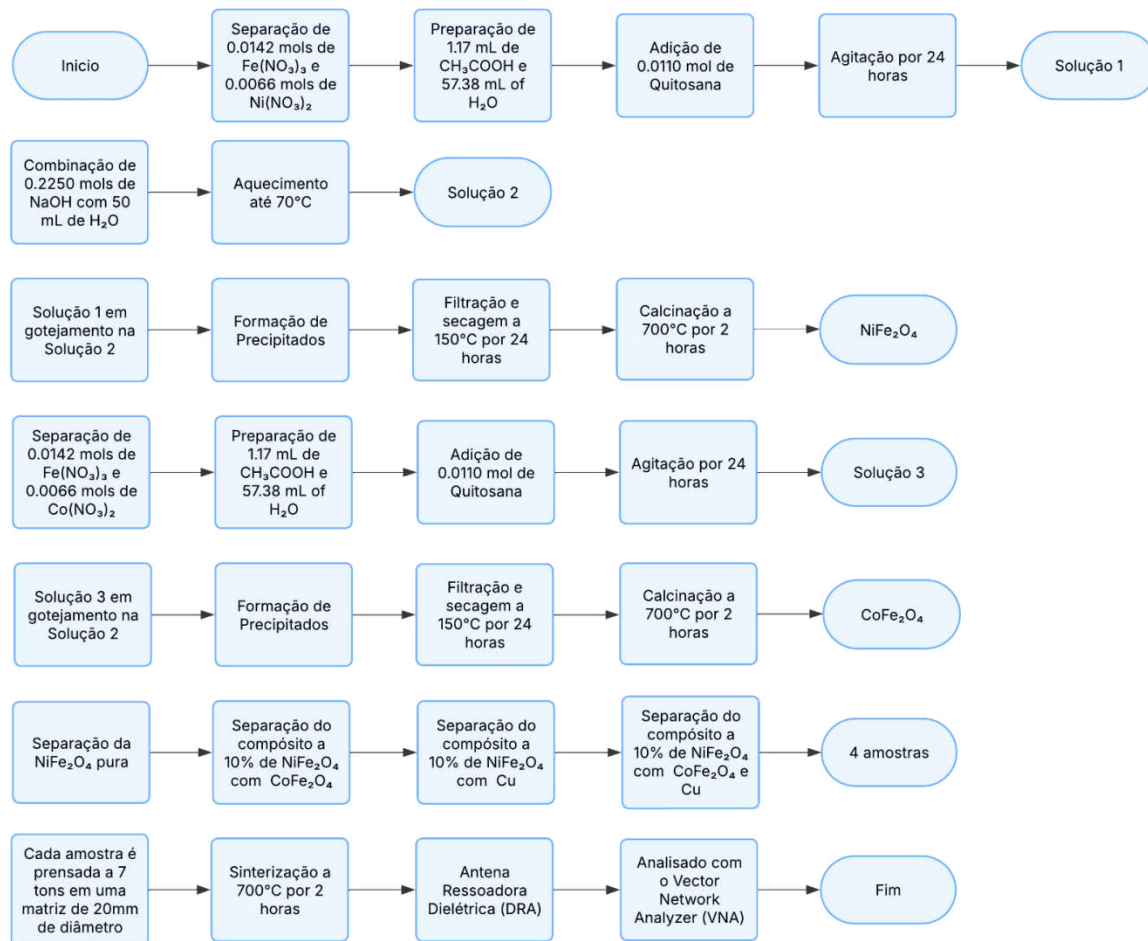


Fig. 3 - Fluxograma do Processo

Os ressoadores foram então caracterizados usando o Analisador de Rede Vetorial (VNA) Rohde and Schwarz ZND (100 kHz - 8,5 GHz) juntamente com o Kit de Avaliação Dielétrica (DAK) 3.5 da SPEAG, em uma faixa de frequência de 0,2 a 8,5 GHz. Durante a caracterização, foram medidos os valores de permissividade e tangente de perda dielétrica para fins de simulação. Subsequentemente, foi realizada uma análise experimental de cada antena de ressonadora dielétrica (DRA), obtendo-se os gráficos de coeficiente de reflexão.

2.3. Dispositivos Propostos

2.3.1. Características Construtivas

O dispositivo foi fabricado com um substrato FR4 de 1,54 mm de altura, com alimentação por linha de microfita e plano de terra completo. O DRA, na forma de cilindro, foi posicionado sobre a linha de microfita em diferentes posições de acordo com o valor de J_d . Mais detalhes podem ser vistos na fig. 4.

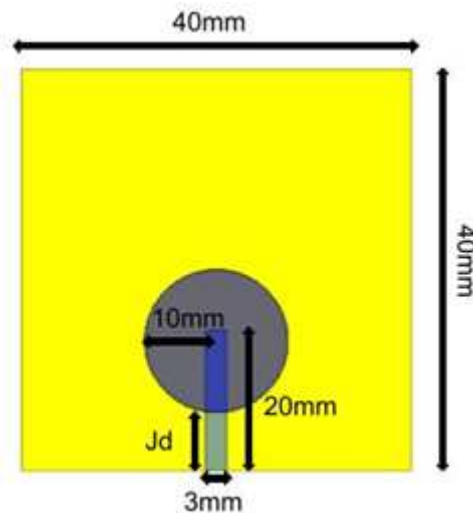


Fig. 4 - Dimensões do DRA. (Autoria própria)

2.3.2. Análise dos Resultados

A análise dos compósitos de ferrita de níquel, ferrita de cobalto e cobre metálico para a construção de antenas na faixa de frequência de 7,0 a 8,5 GHz foi realizada utilizando um Analisador de Rede Vetorial (VNA). A avaliação das propriedades de permissividade e tangente de perda em diferentes frequências revelou informações importantes sobre os materiais estudados.

A ferrita de níquel apresentou uma permissividade igual a 5,00478 na frequência inicial de 7 GHz, acompanhada de uma tangente de perda correspondente de 0,05551. Com o aumento da frequência para 8,5 GHz, a permissividade aumentou para 5,08997, enquanto a tangente de perda diminuiu para 0,04936.

Quando a ferrita de cobalto foi adicionada ao compósito de ferrita de níquel, novos comportamentos foram observados. A 7,0 GHz, o compósito apresentou uma permissividade de 5,09249 e uma tangente de perda de $3,344 \times 10^{-4}$. Com o aumento da frequência para 8,5 GHz, a permissividade continuou subindo, atingindo 5,23069, enquanto a tangente de perda aumentou para $6,66 \times 10^{-4}$.

A adição de cobre metálico ao compósito de ferrita de níquel também teve um impacto significativo nas propriedades dielétricas. A 7,0 GHz, o compósito demonstrou uma permissividade de 6,34264 e uma tangente de perda de 0,01445. Em 8,5 GHz, a permissividade aumentou para 6,40722, enquanto a tangente de perda diminuiu para $3,19789 \times 10^{-4}$.

Por fim, o compósito de ferrita de níquel com adição de ferrita de cobalto e cobre metálico apresentou resultados interessantes. A 7,0 GHz, a permissividade foi medida em 5,27526, enquanto a tangente de perda foi de $8,60399 \times 10^{-4}$. Em 8,5 GHz, a permissividade manteve-se semelhante, em torno de 5,3301, e a tangente de perda diminuiu para $5,9 \times 10^{-4}$.

Para efeito de análise e uma melhor comparação é possível observar a diferença comportamental dos materiais medidos nas fig. 5 e 6, que apresentam as permissividades e tangentes de perdas, respectivamente.

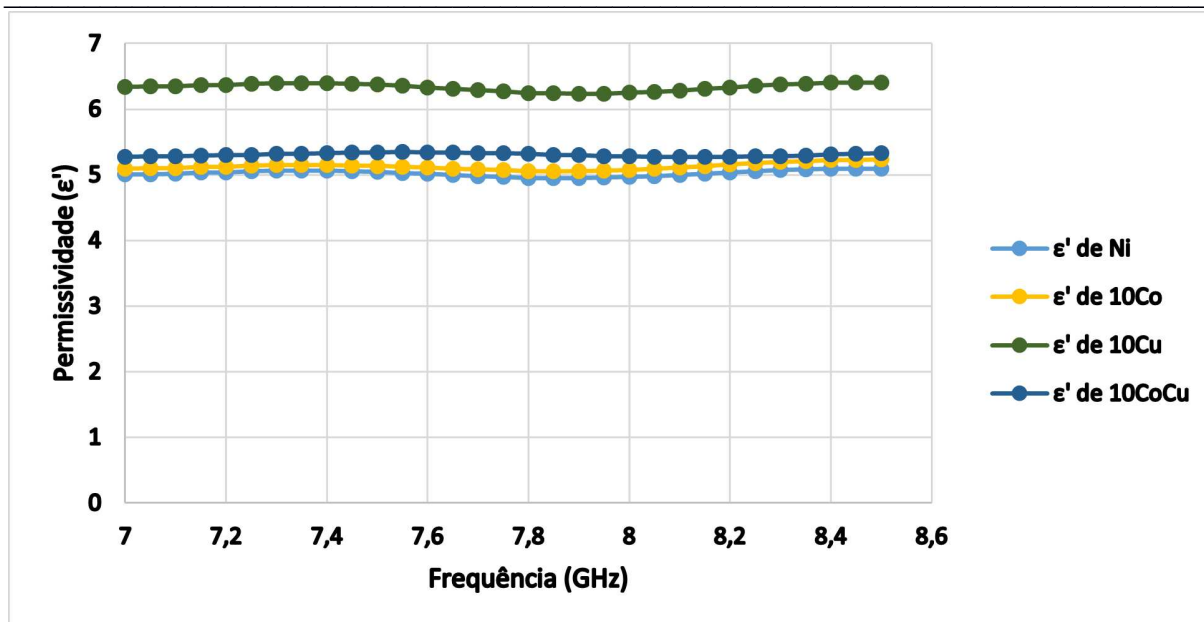


Fig. 5 - Gráfico de análise das permissividades dos DRA's entre 7 e 8,5 GHz. (Autoria própria)

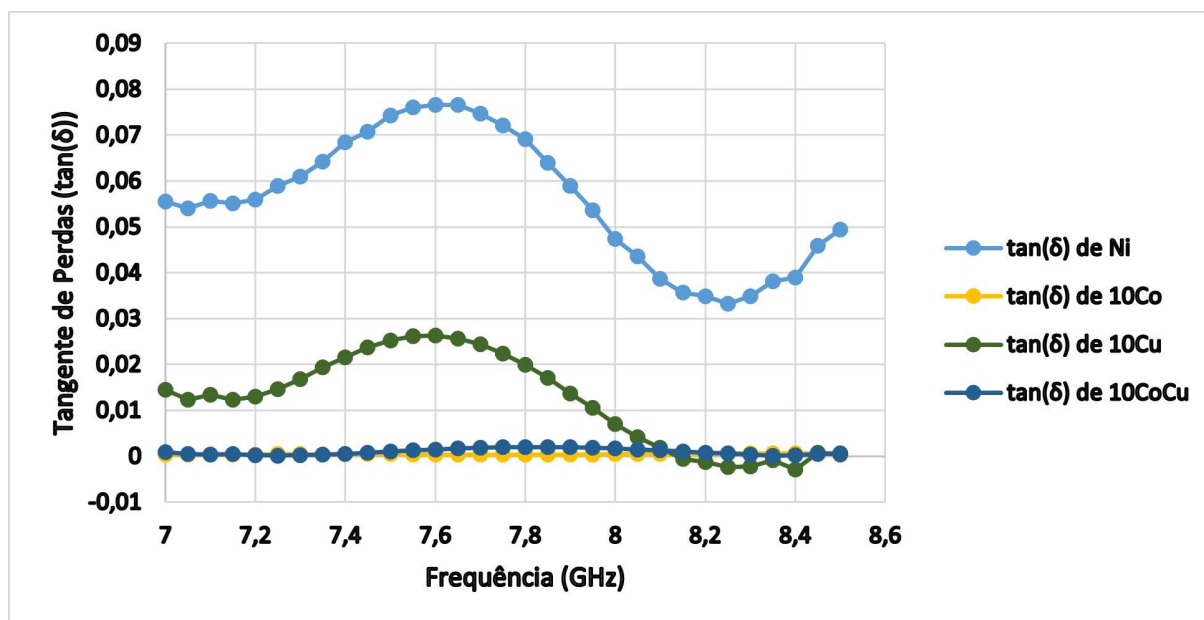


Fig. 6 - Gráfico de análise das tangentes de perdas dos DRA's entre 7 e 8,5 GHz. (Autoria própria)

Os resultados indicam que a adição de ferrita de cobalto e cobre metálico ao composto de ferrita de níquel causou alterações nas propriedades eletromagnéticas, sendo a mais expressiva a adição do cobre, no caso da permissividade, e a ferrita de cobalto, no caso da tangente de perdas. De modo geral, os compósitos apresentaram valores de permissividade mais elevados em comparação com a ferrita de níquel pura, sugerindo melhorias nas propriedades dielétricas. Além disso, as tangentes de perda variaram com a frequência, indicando diferentes níveis de perdas dielétricas nos compósitos.

Esses achados fornecem informações valiosas sobre o desempenho dos compósitos investigados na faixa de frequência alvo. A adição desses materiais permite um maior controle sobre as propriedades dielétricas, possibilitando a produção de dispositivos com objetivos mais específicos. As variações na tangente de perda indicam o potencial para a redução de perdas e melhoria da eficiência geral das antenas.

Investigações adicionais, incluindo caracterizações mais abrangentes e estudos de simulação, são necessárias para explorar o comportamento eletromagnético e o desempenho dos compósitos em projetos práticos de antenas.

3. CONCLUSÕES

Os resultados das análises fornecem informações valiosas sobre o desempenho dos compósitos investigados na faixa de frequência alvo. A adição dos materiais permite um maior controle sobre as propriedades dielétricas e a produção de um dispositivo com objetivos mais específicos. As variações na tangente de perda indicam o potencial para a redução de perdas e a melhoria da eficiência geral da antena.

Espera-se que os achados deste estudo contribuam para o desenvolvimento de antenas eficientes e compactas para sistemas de comunicação sem fio operando na faixa de frequência de micro-ondas. Além disso, a exploração de diferentes materiais, incluindo ferritas e cobre metálico, oferecerá insights sobre a viabilidade de novos projetos de antenas e ajudará na contribuição para avanços na tecnologia de antenas.

Em resumo, a investigação da ferrita de níquel, ferrita de cobalto e cobre metálico no contexto da construção de antenas, utilizando análises baseadas em VNA, representa um passo essencial para o desenvolvimento de antenas avançadas para aplicações emergentes em comunicações sem fio.

4. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] PINHO, L. C. A. B. de. *Materiais magnéticos e suas aplicações*. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores) – Universidade do Porto, Porto, 2009. Disponível em: <https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/59887/1/000135917.pdf>. Acesso em: 06/02/2025.
- [2] KOBAYASHI, Yukio. *Estudo das propriedades dielétricas e estruturais de cerâmicas multifásicas obtidas a partir do sistema $(1-x)[Pb(Mg_{1/3}Nb_{2/3})O_3]-x[PbTiO_3]$* . 2024. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia de Materiais) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2024. Disponível em: https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18136/tde-21082024-111538/publico/Kobayashi_Yukio_DO.pdf. Acesso em: 01/03/2025.
- [3] GADBEM, J. M. de O. *Estudo de compósitos cerâmicos para aplicação como materiais absorvedores de radiação eletromagnética (MARE) na faixa de frequência de micro-ondas*. 2024. Relatório (Iniciação Científica) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2024. Disponível em: http://mtc-m21d.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m21d/2024/10.01.19.56/doc/Relatorio_Final_Julia_Maria_de_Oliveira_Gadbem_2024.pdf. Acesso em: 06/02/2025.
- [4] ARAÚJO, Alyson Leite Marreiro de; SILVA, Isaac Barros Tavares da. *Avaliação da caracterização dielétrica como dado de entrada para simulação de ressonadores dielétricos*. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Ciência e Tecnologia) – Universidade Federal Rural do Semiárido, Mossoró, 2021. Disponível em: <https://repositorio.ufersa.edu.br/server/api/core/bitstreams/41241a35-5c58-4c6d-9fb4-f8cf835ebad0/content>. Acesso em: 07/02/2025.
- [5] SOARES, Elvis Ferreira. *Projeto e análise de sensores planares de microondas para caracterização dielétrica de materiais*. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Telecomunicações) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2022. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/52243>. Acesso em: 01/03/2025.
- [6] MAZZOLA, Cristian Franzoi. *Técnicas de medição da permissividade complexa de dielétricos sólidos através da formação de amostras como elementos capacitivos de dimensões conhecidas*. 2020. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Florianópolis, 2020. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/218589>. Acesso em: 07/02/2025.
- [7] MORAIS, J. E. V. de; NEVES, A. J. C.; SILVA, M. A. S.; COSTA, D. B. da; SOUSA, D. G.; CHAVES, J.; SOMBRA, A. S. B. *Estudo de antenas ressoadoras dielétricas baseadas em $FeNbTiO_6$ $(ZnO)_x$ para aplicação em dispositivos de micro-ondas*. 2015. Trabalho apresentado no XXXIII Simpósio Brasileiro de Telecomunicações – SBrT 2015, Juiz de Fora, MG, 2015. Disponível em: https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/60316/1/2015_eve_jevdemorais.pdf. Acesso em: 10/02/2025.
- [8] SILVA FILHO, José Miranda da. *Estudo das propriedades dielétricas e elétricas das matrizes $Mg_4Nb_2O_9$ para aplicações em componentes de rádio frequência e micro-ondas*. 2017. Tese (Doutorado em Engenharia de Teleinformática) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2017. Disponível em: https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/29451/7/2017_tese_jmsilvafilho.pdf. Acesso em: 20/02/2025.
- [9] SILVA, Anderson Gonçalves. *Estudo e desenvolvimento de materiais com propriedades dielétricas para aplicação em dispositivos de micro-ondas*. 2014. Dissertação (Mestrado em Ciências e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Alfenas, Alfenas, 2014. Disponível em: <https://bdtd.unifal-mg.edu.br:8443/handle/tede/590>. Acesso em: 01/03/2025.
- [10] FERREIRA, M. C. M.; NOBRE, M. A. L.; LANFREDI, S. *Síntese de Ferritas de Cobalto com Diferentes Estequiometrias pelo Método de Coprecipitação*. 2020. Anais do 64º Congresso Brasileiro de Cerâmica, Águas de Lindóia, SP, 7 a 10 dez. 2020. Disponível em: <https://www.metallum.com.br/64cbc/anais/PDF/02-010.pdf>. Acesso em: 20/02/2025.

-
- [11] ROST, Nathanne Cristina Vilela et al. *Comparação entre métodos de síntese de partículas magnéticas*. 2016. Anais do XX Encontro Latino Americano de Iniciação Científica, XVI Encontro Latino Americano de Pós-Graduação e VI Encontro de Iniciação à Docência, Universidade do Vale do Paraíba, São José dos Campos, SP. Disponível em: https://www.inicepg.univap.br/cd/INIC_2016/anais/arquivos/0020_0605_01.pdf. Acesso em: 27/02/2025.
- [12] MELO, Rosane Saraiva. *Propriedades magnéticas de ferritas do tipo AFe_2O_4 ($A = Co^{2+}, Ni^{2+}, Cu^{2+}$ e Zn^{2+}) obtidas pelo método hidrotermal assistido por micro-ondas*. 2016. Dissertação (Mestrado em Física) – Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2016. Disponível em: <https://tedebc.ufma.br/jspui/handle/tede/987>. Acesso em: 28/02/2025.