



OBTENÇÃO DE FERRITA DE COBALTO COM FERRITA DE NÍQUEL APLICADA À DISPOSITIVOS DE MICRO-ONDAS

Jady Dayane de Oliveira Andrade¹, Idalmir de Souza Queiroz Jr.²

Resumo: Este estudo investiga a síntese, caracterização e aplicação de ferrita de cobalto com adição de ferrita de níquel, e tem como objetivo utilizá-la em antenas ressoadoras dielétricas (*Dielectric Resonator Antennas* — DRA) que operam na faixa de frequência de 1 a 5 GHz. Os materiais foram obtidos por meio do método de coprecipitação. A pesquisa analisa características como permissividade e tangente de perda dielétrica, parâmetros fundamentais para o funcionamento e a eficiência das antenas DRA. A adição da ferrita de níquel visa aprimorar essas propriedades, possibilitando a criação de materiais com melhor desempenho em aplicações de micro-ondas. A aplicação dos materiais em antenas busca melhorar sua eficiência, contribuindo para o desenvolvimento de dispositivos mais compactos e eficazes, voltados para sistemas de telecomunicações.

Palavras-chave: Ferrita de Cobalto, Coprecipitação, Ressorador Dielétrico.

1. INTRODUÇÃO

No contexto contemporâneo, a crescente demanda por sistemas de comunicação sem fio tem impulsionado o desenvolvimento de dispositivos operantes na faixa de micro-ondas, com o avanço da tecnologia e a necessidade de redes mais eficientes e confiáveis, a busca por antenas de alto desempenho e propriedades eletromagnéticas aprimoradas tornou-se um desafio essencial tanto para a indústria quanto para a pesquisa acadêmica. A evolução desses sistemas depende diretamente da escolha e otimização dos materiais utilizados na construção das antenas, visando maximizar sua eficiência, reduzir perdas e melhorar a compatibilidade eletromagnética.

Dentre os materiais usados na fabricação de antenas e dispositivos de micro-ondas, as ferritas se destacam devido às suas propriedades magnéticas únicas, que possibilitam a manipulação do comportamento das ondas eletromagnéticas em determinadas faixas de frequência. Para esta aplicação, a ferrita de cobalto (CoFe_2O_4) é amplamente estudada por apresentar excelentes características magnéticas e dielétricas, tornando-se uma alternativa para aplicações em dispositivos de comunicação.

A síntese da ferrita de níquel e da ferrita de cobalto por meio do método de coprecipitação é uma abordagem utilizada na produção de materiais magnéticos devido à sua eficiência, esse processo consiste na dissolução de nitratos de níquel e cobalto em uma solução ácida de baixa concentração contendo nitrato de ferro. Em seguida, um agente precipitante, como o hidróxido de sódio (NaOH), é adicionado para ajustar o pH da solução, desencadeando a coprecipitação. O material precipitado é então coletado através da filtragem e submetido à calcinação, no qual é aquecido a temperaturas em torno dos 700°C . A principal vantagem desse método reside no controle preciso da composição química, possibilitando a obtenção de ferritas para construção do DRA.

Dessa forma, este trabalho tem como objetivo a obtenção e aplicação da ferrita de cobalto adicionada de ferrita de níquel, estudando suas propriedades eletromagnéticas e sua aplicabilidade em dispositivos de comunicação na faixa de micro-ondas, investigando as características estruturais, magnéticas e dielétricas do material obtido, além disso, busca-se avaliar a influência da adição na resposta eletromagnética da ferrita, relacionando suas propriedades com o desempenho esperado em aplicações tecnológicas.

2. DESENVOLVIMENTO

2.1. Referencial teórico

2.1.1. Propriedades Eletromagnéticas das Ferritas

As ferritas são materiais cerâmicos com comportamento ferromagnético, caracterizadas por sua estrutura cristalina única e propriedades excepcionais, incluindo notáveis características magnéticas, elétricas e ópticas. Elas se destacam por sua elevada estabilidade termodinâmica e excelente resistência à corrosão, o que as torna versáteis e valiosas para diversas áreas da ciência e da tecnologia. Devido a essas qualidades, as ferritas têm sido amplamente aplicadas em dispositivos eletrônicos e sistemas magnéticos. O uso dessas substâncias continua a crescer, consolidando-as como materiais relevantes no desenvolvimento de novas soluções e tecnologias no campo da ciência dos materiais [1].

As ferritas têm sido objeto de estudos intensivos ao longo das últimas décadas, devido às suas propriedades que as tornam ideais para dispositivos elétricos e eletrônicos, como componentes em sistemas de micro-ondas e sensores. As propriedades eletromagnéticas dessas substâncias estão diretamente relacionadas à sua composição química, ao tamanho das partículas e ao método de preparação utilizado durante sua fabricação, fatores que são determinantes para o desempenho e a eficiência em suas aplicações tecnológicas [2].

2.1.2. Permissividade e Tangente de Perdas

A permissividade relativa (ϵ_r) é uma propriedade fundamental dos materiais dielétricos, diretamente relacionada à capacidade do material de armazenar energia elétrica em presença de um campo eletromagnético. Essa propriedade influencia o comportamento de antenas, guias de ondas e dispositivos de micro-ondas, pois afeta o confinamento e a propagação das ondas eletromagnéticas [3]. Materiais com alta permissividade podem diminuir o tamanho físico de antenas, permitindo a miniaturização sem comprometer o desempenho [4].

Por outro lado, a tangente de perdas dielétricas ($\tan \delta$) expressa as perdas de energia associadas à dissipação do campo elétrico no material. Em aplicações de micro-ondas, baixos valores de $\tan \delta$ são desejáveis, pois indicam que o material possui pequenas perdas e, consequentemente, maior eficiência [5]. Os compósitos de ferritas, como a adição de ferrita de níquel à ferrita de cobalto, podem ajustar tanto a permissividade quanto a tangente de perdas, possibilitando o equilíbrio entre alto desempenho e estabilidade em altas frequências [6].

Além disso, a variação controlada desses parâmetros é essencial para o ajuste fino de antenas ressoadoras dielétricas (DRA), permitindo o controle de frequência de operação e largura de banda, por exemplo. Esses ajustes são fundamentais para melhorar o desempenho das antenas em uma ampla gama de aplicações, desde sistemas de comunicação até dispositivos de radar. Segundo estudos recentes, o uso de compostos de ferritas tem se mostrado promissor para alcançar um conjunto otimizado dessas propriedades, resultando em antenas com melhor eficiência e maior capacidade de adaptação a diferentes condições operacionais [7].

2.1.3. Caracterizações Dielétricas

As caracterizações dielétricas são etapas fundamentais na avaliação do comportamento eletromagnético dos materiais, especialmente quando aplicados a dispositivos de micro-ondas e telecomunicações. A análise dessas propriedades permite compreender como os materiais interagem com ondas eletromagnéticas, influenciando diretamente o desempenho de componentes, como as antenas. Entre os principais métodos de análise disponíveis, destaca-se o uso do Analisador Vetorial de Redes (Vector Network Analyzer — VNA), uma ferramenta essencial para medir parâmetros de reflexão, transmissão e, consequentemente, extrair informações precisas sobre a permissividade e a tangente de perdas dos materiais em estudo [8].

O VNA possibilita a obtenção da resposta em frequência do material, permitindo não apenas avaliar sua estabilidade dielétrica ao longo de uma ampla faixa de operação, mas também fornecer dados fundamentais para a modelagem e otimização de antenas e dispositivos ressonantes [8]. Dessa forma, essas medições viabilizam uma análise detalhada do impacto das propriedades do material no desempenho final dos dispositivos, possibilitando ajustes na composição química ou no processo de fabricação para atender às exigências específicas de cada aplicação [9].

Além disso, as medições realizadas com o VNA permitem a observação do comportamento do material em diferentes faixas de frequência, sendo particularmente úteis para o desenvolvimento de antenas operando entre 1 e 5 GHz, uma faixa típica de aplicações em telecomunicações, radares e sensores sem fio [10]. A importância do VNA se torna ainda mais evidente no estudo de compostos de ferritas, pois a variação na composição química afeta diretamente a resposta dielétrica do material. Essa influência pode resultar em alterações significativas na estabilidade da permissividade e no controle das perdas, fatores cruciais para a miniaturização e eficiência de antenas e outros dispositivos de radiofrequência [6]-[7].

2.1.4. Ferritas e Suas Aplicações em Micro-ondas

As ferritas são materiais cerâmicos de grande interesse tecnológico devido à sua combinação única de propriedades magnéticas e dielétricas, o que as torna altamente adequadas para aplicações em dispositivos de micro-ondas, como antenas e absorvedores de radiação eletromagnética [11]. Essas características fazem com que as ferritas sejam amplamente utilizadas na miniaturização de componentes eletrônicos e na melhoria do desempenho de sistemas de telecomunicações, radares e sensores. Além disso, a capacidade de ajustar suas propriedades eletromagnéticas por meio de modificações estruturais amplia ainda mais seu potencial de aplicação [12].

A adição de materiais nas ferritas, especialmente com metais de transição como o níquel, permite a personalização de suas propriedades para atender a requisitos específicos de diferentes dispositivos. Esse processo altera parâmetros fundamentais, como a permissividade dielétrica, a permeabilidade magnética e as perdas, possibilitando a obtenção de materiais com desempenho otimizado para determinadas faixas de frequência [13].

Estudos demonstram que a introdução de íons na estrutura da ferrita de cobalto pode reduzir as perdas, ajustar a permissividade e proporcionar um melhor controle sobre as características de propagação da onda eletromagnética no material. Essas alterações são fundamentais para aplicações em faixas de GHz, onde a permissividade impacta diretamente a eficiência dos dispositivos. Dessa forma, os compósitos à base de ferritas representam uma alternativa promissora para a fabricação de antenas compactas, com bom acoplamento de campo e alta eficiência, sendo também aplicáveis em componentes de blindagem eletromagnética e substratos para circuitos de alta frequência [14].

2.1.5. Antenas Ressonadoras Dielétricas (DRA) e Materiais Avançados

As antenas ressonadoras dielétricas (DRA) têm atraído cada vez mais atenção nas últimas décadas devido às suas diversas vantagens, como alta eficiência, baixo perfil, ampla faixa de operação e facilidade de integração em sistemas compactos e miniaturizados. Essas características tornam as DRAs uma escolha promissora para aplicações em comunicações sem fio, radares e sensores avançados. O desempenho dessas antenas está intimamente relacionado às propriedades dielétricas do material utilizado, sendo a escolha do substrato um dos fatores mais importantes no desenvolvimento e na otimização do projeto dessas estruturas [15].

Dentre os materiais mais estudados para esse fim, destacam-se as ferritas com cobalto e níquel, que possibilitam uma engenharia precisa da permissividade elétrica e das perdas dielétricas, permitindo o ajuste fino das propriedades eletromagnéticas da antena. Além disso, a incorporação de materiais magnético-dielétricos contribui significativamente para a miniaturização das antenas, reduzindo o tamanho físico sem comprometer a eficiência de radiação. Esse avanço possibilita o desenvolvimento de dispositivos cada vez menores e mais eficientes, adequados para aplicações modernas que exigem alto desempenho e baixo consumo energético [14].

2.1.6. Técnicas de Obtenção de Ferritas por Coprecipitação

O método de coprecipitação é amplamente utilizado para a síntese de ferritas devido à sua simplicidade, baixo custo e eficiência na produção. Essa técnica permite a obtenção de materiais com alta pureza e boa reprodutibilidade, fatores essenciais para aplicações tecnológicas avançadas. Durante o processo, os precursores metálicos são dissolvidos em solução aquosa e posteriormente precipitados simultaneamente por meio da adição de agentes precipitantes, como hidróxidos ou carbonatos. Após essa etapa, o material obtido passa por um processo de calcinação, que promove a formação da estrutura cristalina desejada e a eliminação de compostos indesejáveis, como resíduos orgânicos e solventes [16].

No contexto das ferritas, a coprecipitação se destaca por possibilitar uma distribuição homogênea dos íons na matriz cristalina, o que influencia diretamente as propriedades magnéticas e dielétricas do material final. Esse controle na composição química é essencial para otimizar o desempenho do material em diferentes aplicações. Além disso, a técnica permite um ajuste preciso da razão cobalto-níquel, viabilizando a personalização das propriedades do material para atender às exigências específicas de dispositivos, como antenas miniaturizadas e componentes de micro-ondas. Dessa forma, a coprecipitação se mostra uma alternativa promissora para o desenvolvimento de novos materiais com características aprimoradas para aplicações tecnológicas avançadas [17].

2.2. Metodologia

2.2.1. Materiais e Reagentes

- Nitrato de Ferro
- Nitrato de Cobalto
- Hidróxido de Sódio
- Quitosana
- Água destilada
- Béquer
- Termômetro
- Espátula
- Pipeta volumétrica
- Pipetador
- Agitador magnético c/ aquecimento
- Ácido acético
- Barra magnética
- Pipeta de Pasteur
- Almofariz e Pistilo
- Microtubo
- Filme plástico
- Mufla
- Estufa

2.2.2. Procedimento Experimental

Para a Ferrita de Cobalto (CoFe_2O_4), a síntese inicia-se através da preparação da solução A envolvendo Nitrato de Ferro ($\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$), 98%, Nitrato de Cobalto ($\text{Co}(\text{NO}_3)_2$), 98%, Quitosana, 90%, e Ácido Acético, P.A., a 2% diluído em água destilada. A solução é preparada seguindo as seguintes proporções:

- Para cada 1 g de ferrita de cobalto, seguindo a estequiometria, são necessários aproximadamente 3,4437 g de nitrato de ferro e 1,2404 g de nitrato de cobalto e juntos eles têm massa de 4,6841 g;
- Para cada 10 g de reagente utiliza-se 125 mL de solução, para o caso, após o balanceamento, precisa-se de 58,55 mL, onde 2% - 1,17 mL - são de ácido acético e 57,38 mL são H_2O ;
- Para cada 1 g de nitrato adiciona-se 0,25 g de quitosana, logo, teremos 1,17 g de quitosana adicionados a solução A.

Após a adição da primeira solução ao béquer, ela permanece sob agitação magnética por 24 horas, como mostrado na fig. 01, para só então ser gotejada na solução B.

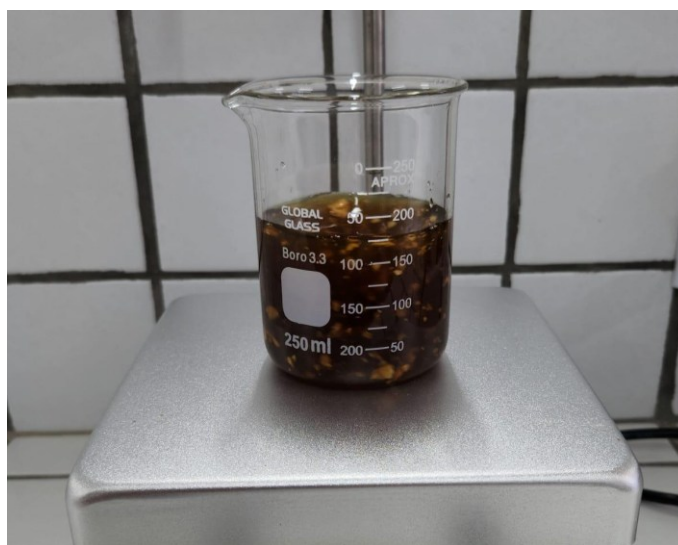


Fig. 01 - Solução A em agitação magnética. (Autoria própria)

A segunda solução consiste em Hidróxido de Sódio, P.A., diluído em água destilada. A solução é preparada através das seguintes proporções:

- Para cada litro usa-se 5 mols de hidróxido de sódio, logo serão 9 g;
- Para cada 90 g adiciona-se 500 mL de água destilada, na solução tem-se 50 mL então.

Após o preparo, a solução é aquecida até atingir 70°C , sob monitoramento constante com um termômetro de mercúrio. Ao alcançar a temperatura desejada, inicia-se o gotejamento da solução A sobre a solução B, observando-se a formação dos precipitados, como mostrado na fig. 02. Esses precipitados, então, são lavados até que a solução atinja pH neutro.

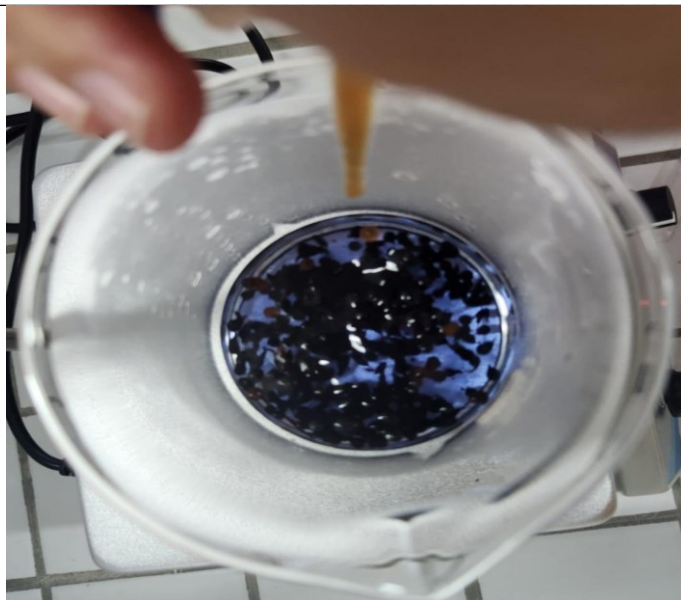


Fig. 02 - Formação dos precipitados. (Autoria própria)

Em seguida, o precipitado é filtrado e levado à estufa a 150 °C por 24 horas, com o objetivo de eliminar toda a umidade. Após essa etapa, o material é transferido para o forno mufla, onde é sinterizado a aproximadamente 700 °C por 2 horas. Finalizado o processo de sinterização, o sólido obtido é macerado, ficando como na fig. 03, e pesado, para que então seja feito o processo de adição com a proporção da massa total para fazer o DRA sendo estabelecida como 2 g.



Fig. 03 - Ferrita de Cobalto à esquerda e Ferrita de Níquel à direita, após a mufla. (Foto cedida por Livia Cabral Maia)

A Ferrita de Níquel, material usado no composto, é obtida usando os mesmos processos da Ferrita de Cobalto, havendo apenas uma substituição dos sais utilizados, que ao invés de usar o Nitrato de Cobalto é usado o Nitrato de Níquel. A composição é feita através da proporção onde 100% do material corresponde a 2 g, 5% é 0,1 g e 10% é 0,2 g. Por fim, o material puro e os compostos são separados, adicionados um a um na matriz para uma prensagem de 5 toneladas até ficar estável e os DRA's serem retirados cuidadosamente. O resultado é uma pastilha como a apresentada na fig. 04.



Fig. 04 - DRA após ser retirado da matriz. (Autoria Própria)

Após ser retirado da matriz, o DRA passa por uma nova sinterização a 700 °C por 2 horas para aprimorar sua resistência mecânica. Todo o processo de síntese dos materiais, incluindo a ferrita de níquel e a de cobalto, seguiu as etapas apresentadas no fluxograma da Fig. 05.

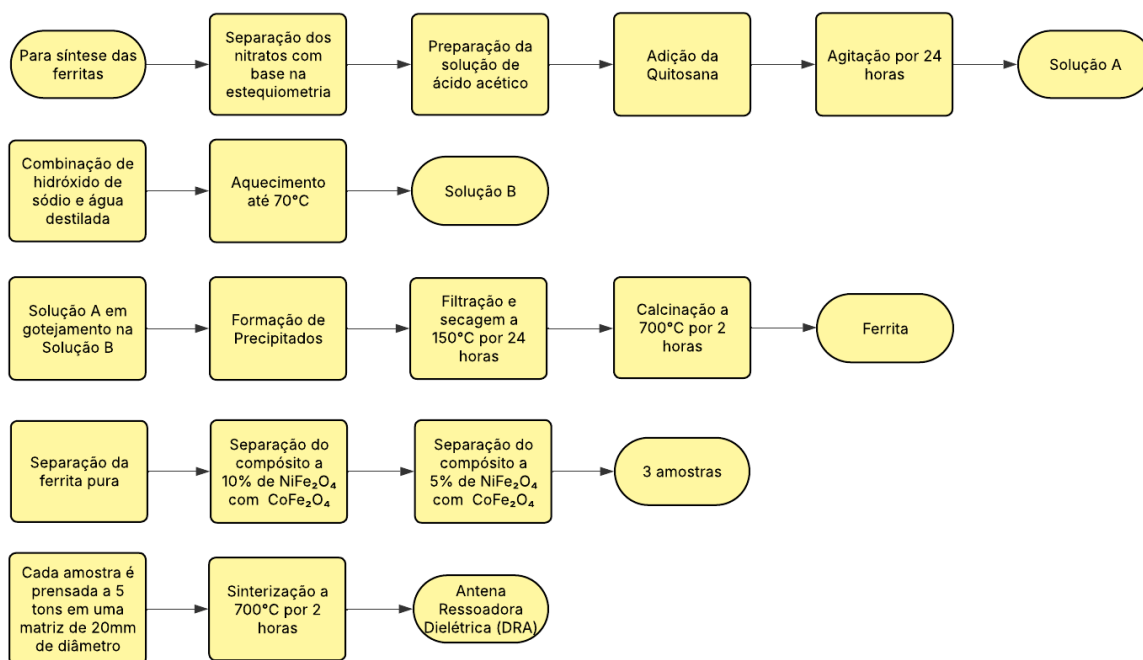


Fig. 05 - Fluxograma do processo de fabricação do DRA. (Autoria Própria)

2.3. Resultados

Os ressoadores foram levados para uma caracterização dielétrica em um 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 1 a 5 GHz.

Os resultados indicaram que a ferrita de cobalto pura apresentou uma permissividade inicial de 7,65776 e uma tangente de perdas de 0,11818 na frequência de 1 GHz. Com o aumento da frequência, esses valores diminuíram, atingindo 6,80939 e 0,0926503, respectivamente, em 5 GHz. Com a adição de 5% de ferrita de níquel, a permissividade inicial reduziu para 4,35971 e a tangente de perdas para 0,0660612, seguindo a mesma tendência de queda e chegando a 4,06544 e 0,0491473 em 5 GHz. Já para o composto de 10% com ferrita de níquel, os valores iniciais foram 8,05891 para permissividade e 0,169593 para tangente de perdas, reduzindo-se para 6,89112 e 0,116811 na frequência final de 5 GHz.

Para efeitos de análise e comparação, os resultados das permissividades medidas são apresentados na fig. 06 e das tangentes de perdas na fig. 07.

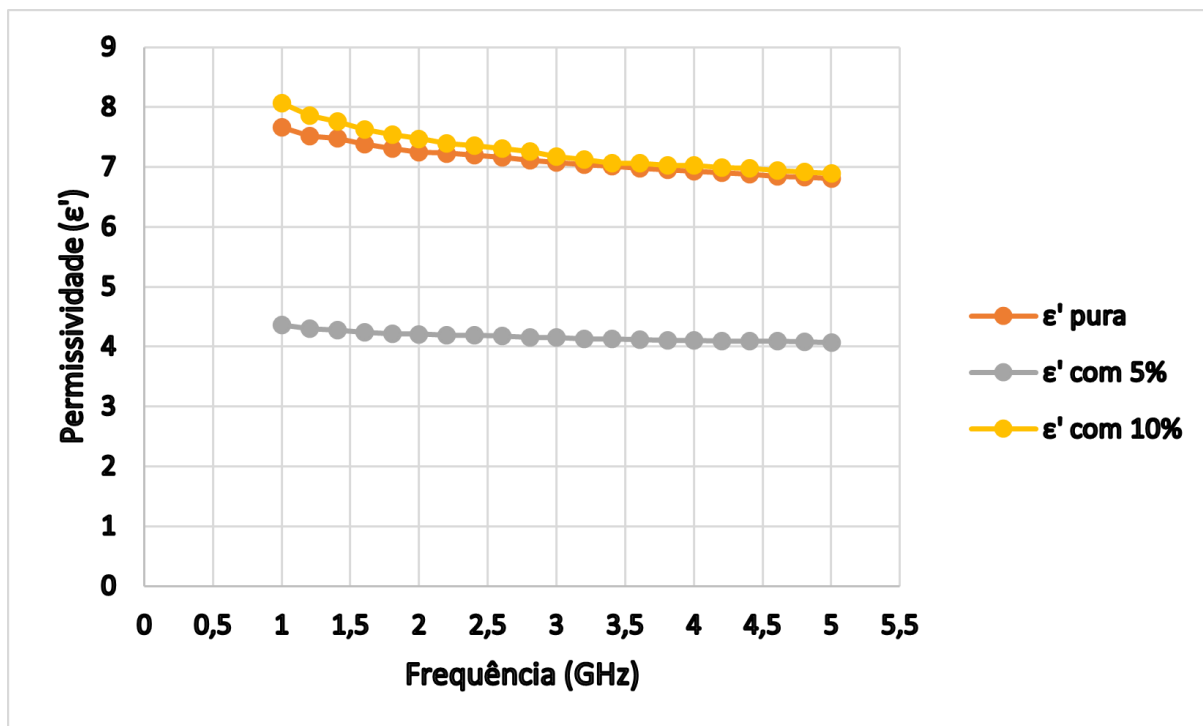


Fig. 06 - Gráfico de análise das permissividades medidas. (Autoria própria)

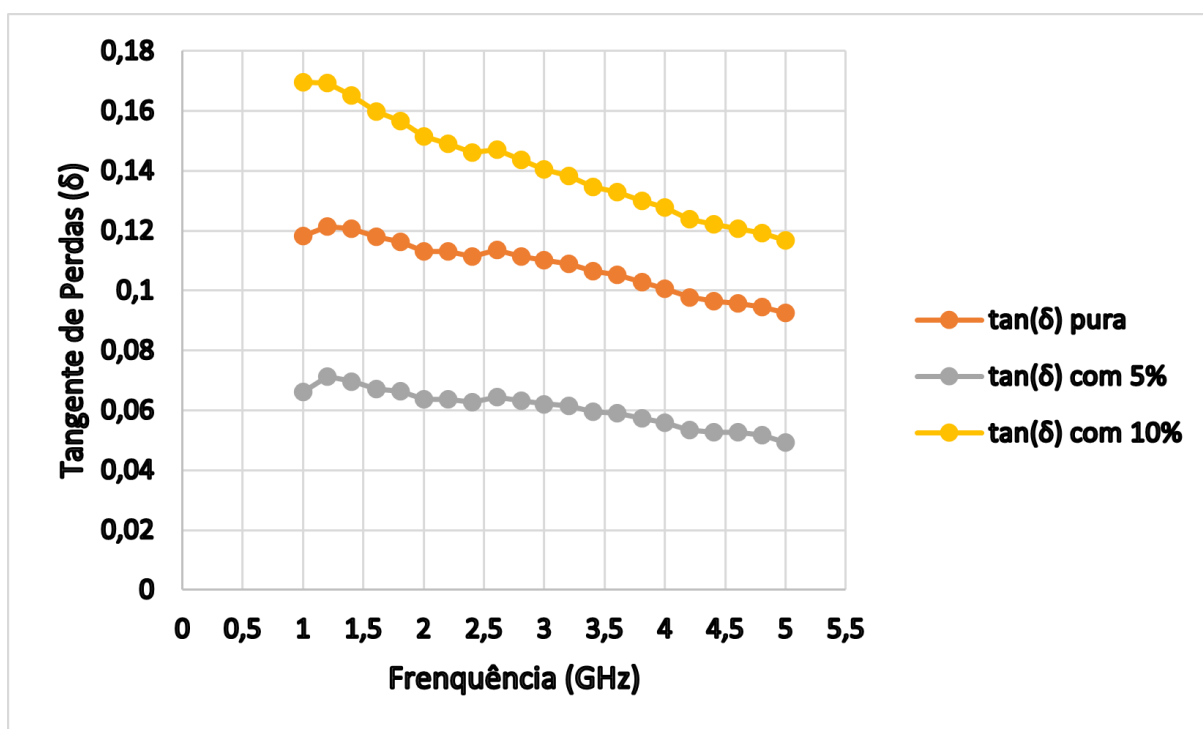


Fig. 07 - Gráfico de análise das tangentes de perdas medidas. (Autoria própria)

Os gráficos demonstram que a adição de ferrita de níquel na de cobalto impacta diretamente suas propriedades dielétricas, alterando tanto a permissividade quanto a tangente de perdas ao longo da faixa de frequência analisada. A composição com 5% de ferrita de níquel resultou em uma redução significativa da permissividade. Além disso, a tangente de perdas também teve uma queda, indicando um material com menores perdas dielétricas. Essa característica é considerável para aplicações onde a eficiência da transmissão de ondas eletromagnéticas é importante, pois menores perdas contribuem para a melhoria do desempenho do sistema.

Por outro lado, o composto com 10% de ferrita de níquel provocou um efeito distinto: a permissividade inicial aumentou para 8,05891, superando até mesmo o valor da ferrita pura. Entretanto, esse material manteve

uma tendência de variação semelhante à observada nos outros casos, reduzindo sua permissividade conforme a frequência aumentava. Esse comportamento sugere uma possível relação entre permissividade e tangente de perdas, uma vez que a introdução de mais ferrita de níquel proporcionou um ganho inicial na permissividade, mas também resultou em valores mais elevados para a tangente de perdas. Esse fator deve ser considerado ao projetar materiais para aplicações específicas, pois um aumento na permissividade pode ser vantajoso para compactação das antenas, enquanto maiores perdas podem comprometer a eficiência do dispositivo.

Dessa forma, a escolha da concentração ideal de ferrita de níquel deve levar em conta a necessidade de equilibrar essas propriedades, garantindo um desempenho otimizado para cada aplicação desejada.

3. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos neste estudo evidenciam que a adição de ferrita de níquel na ferrita de cobalto tem um impacto significativo nas propriedades dielétricas do material, afetando diretamente sua permissividade e tangente de perdas. A análise demonstrou que a incorporação de 5% de ferrita de níquel resultou em uma redução expressiva da permissividade e das perdas, tornando o material potencialmente mais adequado para aplicações que demandam baixa dissipação de energia. Por outro lado, a adição de 10% proporcionou um aumento na permissividade inicial, mas manteve um comportamento de variação semelhante ao longo da faixa de frequência analisada.

Dessa forma, a escolha da concentração ideal de ferrita de níquel deve ser realizada com base nas exigências específicas de cada aplicação. Em sistemas que priorizam a eficiência na transmissão de sinais eletromagnéticos, materiais com menores perdas são preferíveis. Já para aplicações que exigem alta permissividade para fins de compactação, um teor maior de ferrita de níquel pode ser vantajoso, desde que as perdas sejam controladas.

Os resultados obtidos reforçam a importância do desenvolvimento e da caracterização de materiais dielétricos para aplicações em dispositivos, especialmente no projeto de antenas. Estudos futuros podem explorar a influência de diferentes metodologias de síntese, bem como investigar outras combinações de compósitos para otimizar ainda mais as propriedades desejadas.

4. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] COSTA, A. C. F. M.; DINIZ, A. P.; VIANA, K. M. S.; CORNEJO, D. R.; KIMINAMI, R. H. G. A.. Ferritas $\text{Ni}_{0,5}\text{Zn}_{0,5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ dopada com samário: análise estrutural, morfológica e eletromagnética. *Revista Eletrônica de Materiais e Processos (UFCG)*, v. 5, p. 28-33, 2010. Disponível em: <http://www2.ufcg.edu.br/revista-remap/index.php/REMAP/article/view/191>. Acesso em: 12/03/2025.
- [2] BRITO, A. C. Ferritas Ni-Zn obtidas a partir de precursores hidrotalcitas: síntese, caracterização e propriedades. *Cerâmica*, v. 52, n. 324, p. 252–258, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0366-69132006000400002>.
- [3] AZARA, Paloma Meneleu de; POUZADA, Eduardo Victor dos Santos; TOLOSA, Thiago Antonio Grandi de. Caracterização de materiais – sensores de permissividade elétrica em frequências de micro-ondas. Disponível em: <https://maua.br/files/122019/caracterizacao-materiais-sensores-permissividade-eletrica-frequencias-micro-ondas-261209.pdf>. Acesso em: 12/03/2025.
- [4] SOUZA, Eduardo Amorim Martins de. Antenas compactas e miniaturizadas para sistemas de comunicações sem fio e nanossatélites do padrão CubeSat. 2018. 118 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica e de Computação) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2018. Disponível em: https://repositorio.ufrn.br/bitstream/123456789/26771/1/Antenascompactasminiaturizadas_Souza_2018.pdf. Acesso em: 12/03/2025.
- [5] SILVA FILHO, José Miranda da. Estudo das propriedades dielétricas e elétricas das matrizes $\text{Mg}_4\text{Nb}_2\text{O}_9$ 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: 13/03/2025.
- [6] SILVA, Paulo Antonio Macedo. Síntese de ferritas de cobalto e níquel dopadas com zinco e caracterização de suas propriedades eletromagnéticas. 2015. 168 f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2015. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/20671>. Acesso em: 13/03/2025.
- [7] REBOUÇAS, Esmeraldo Fábio Argolo. Ferritas de magnésio dopadas com cobre e alumínio para a reação de DeSOx . 2015. 146 f. Tese (Doutorado em Química) – Instituto de Química, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2015. Disponível em: <https://repositorio.ufba.br/bitstream/ri/19176/1/TESE%20-%20VERS%C3%83O%20FINAL.pdf>. Acesso em: 13/03/2025.
- [8] DIAS, Patrícia Ariana Grilo. Caracterização de propriedades eletromagnéticas de substratos dielétricos e magnéticos em alta frequência. 2014. 118 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Tecnologia Espaciais) –

- Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2014. Disponível em: https://bdtd.ibict.br/vufind/Record/INPE_1ca5130a48871281fcbac62a209db4. Acesso em: 13/03/2025.
- [9] RODRIGUES, Ádila Priscilla Gomes. Síntese e caracterização de ferritas de níquel dopadas com cobalto e efeito da substituição nas suas propriedades magnéticas. 2013. 95 f. Dissertação (Mestrado em Química) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Ciências Exatas e da Terra, Natal, 2013. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/17766>. Acesso em: 15/03/2025.
- [10] AGÊNCIA NACIONAL DE TELECOMUNICAÇÕES, Resolução nº 742, de 01 de março de 2021. Disponível em: <https://informacoes.anatel.gov.br/legislacao/resolucoes/2021/1512-resolucao-742>. Acesso em: 13/03/2025.
- [11] DŽUNUZOVIĆ, Adis S.; VIJATOVIĆ-PETROVIĆ, Mirjana M.; ILIĆ, Nikola I.; BOBIĆ, Jelena D.; STOJANOVIĆ, Biljana D. Magneto-dielectric properties of ferrites and ferrite/ferroelectric multiferroic composites. *Processing and Application of Ceramics*, v. 13, n. 1, p. 104-113, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.2298/PAC1901104D>. Acesso em: 13/03/2025.
- [12] OKAMOTO, Akira. The invention of ferrites and their contribution to the miniaturization of radios. Em: IEEE GLOBECOM WORKSHOPS, 2009, Honolulu, EUA. IEEE, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/GLOCOMW.2009.5360693>. Acesso em: 15/03/2025.
- [13] FREITAS, Maria Eduarda dos Santos; MAIA, Livia Cabral; SANTOS, Emerson Nunes dos; SALDANHA, Ana Dantas; SILVA, Isaac Barros Tavares da. Avaliação de antenas de microfita com substrato ferrimagnético: aplicação da ferrita de níquel. Em: SEMANA DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA, IX, 2022, Angicos.
- [14] SAGOR, Shohanur Rahman; HOSSAIN, M.A.; HOSSAIN, M.D.; HOSSAIN, Md. Sarowar; SIKDER, M.S. Improved magneto-dielectric properties in Co substituted Cr ferrites for miniaturized antenna applications. *Journal of Alloys and Compounds*, v. 928, p. 179152, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2025.179152>. Acesso em: 14/03/2025.
- [15] 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 FeNbTiO₆ (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_jevdemoraes.pdf. Acesso em: 14/03/2025.
- [16] 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: 14/03/2025.
- [17] ZHANG, C. F.; ZHONG, X. C.; YU, H. Y.; LIU, Z. W.; ZENG, D. C. Effects of cobalt doping on the microstructure and magnetic properties of Mn-Zn ferrites prepared by the co-precipitation method. *Physica B: Condensed Matter*, v. 404, p. 2327–2331, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.physb.2008.12.044>. Acesso em: 14/03/2025.