

PRODUÇÃO E APLICAÇÃO DE FERRITA DE NÍQUEL COM A ADIÇÃO DA FERRITA DE COBALTO EM DISPOSITIVOS DE MICRO-ONDAS

Nívia Maria de Araújo França¹, Idalmir de Souza Queiroz Jr.²

Resumo: Este estudo aborda a produção e caracterização da ferrita de níquel com ferrita de cobalto para aplicações em dispositivos de micro-ondas. O material foi obtido por meio do processo de coprecipitação, o que possibilitou um controle na composição e garantiu sua homogeneidade. A caracterização foi realizada por meio de análise de impedância utilizando um analisador vetorial de redes (VNA), possibilitando a avaliação da resposta eletromagnética da ferrita em Antenas Ressonadoras Dielétricas (DRA), operando na faixa de 1 a 5 GHz. A adição com cobalto visa aprimorar propriedades como condutividade elétrica, anisotropia magnética e estabilidade térmica, tornando a ferrita de níquel mais eficiente para aplicações em telecomunicações. A relevância desse estudo se dá pelo aumento da demanda por antenas de alto desempenho, compactas e com melhor eficiência eletromagnética, contribuindo para a evolução das tecnologias de comunicação sem fio.

Palavras-chave: Ferrita de níquel; Caracterização eletromagnética; Micro-ondas; Coprecipitação.

1. INTRODUÇÃO

O avanço dos sistemas de comunicação sem fio tem impulsionado a pesquisa e o desenvolvimento de novos materiais para dispositivos de micro-ondas. Para atender os requisitos de alto desempenho das antenas, torna-se fundamental a busca por materiais com propriedades eletromagnéticas otimizadas. Nesse contexto, as ferritas, compostos cerâmicos à base de óxidos metálicos, destacam-se devido à elevada permeabilidade magnética, baixa perda dielétrica e estabilidade em uma ampla faixa de frequências, tornando-se alternativas promissoras para aplicações em radio frequência e micro-ondas.

A ferrita de níquel (NiFe_2O_4) é um material ferromagnético com alto potencial de aplicabilidade em dispositivos de micro-ondas, sendo amplamente estudada devido às suas propriedades magnéticas e elétricas. Estudos anteriores demonstraram que a modificação da composição das ferritas por meio da adição pode melhorar significativamente suas propriedades, tornando-as mais eficientes para aplicações tecnológicas [1]. Nesse contexto, a aplicação como ferrita de níquel com ferrita de cobalto (CoFe_2O_4) surge como uma alternativa para otimizar suas características eletromagnéticas, ampliando sua viabilidade como material para antenas.

A adição de ferrita de cobalto pode influenciar diretamente na permissividade dielétrica, condutividade elétrica e anisotropia magnética, contribuindo para a melhoria do desempenho das antenas de micro-ondas. Com isso, esse estudo tem como objetivo principal a produção e caracterização, avaliando sua adequação para aplicações em redes. Uma hipótese central da pesquisa é que uma introdução controlada de cobalto na estrutura da ferrita de níquel resultará melhorias substanciais na resposta eletromagnética do material, aumentando sua eficiência para aplicações em micro-ondas.

Para atingir esse objetivo, foi adotada uma metodologia experimental que inicia com a síntese das amostras por meio do método de coprecipitação. Nesse processo, os nitratos de níquel e cobalto são distribuídos em uma solução ácida diluída, juntamente com nitrato de ferro. Em seguida, adiciona-se um agente precipitante, como o hidróxido de sódio (NaOH), com o objetivo de ajustar o pH da solução, favorecendo a coprecipitação dos compostos desejados. O material resultante é filtrado e submetido à calcinação a aproximadamente 700°C . Em seguida, as amostras são da caracterização estrutural e magnética por meio de técnicas como espectroscopia de impedância, e análise de antenas ressonadoras dielétricas (DRA). A determinação da tangente de perdas e da permissividade do DRA foi realizada por meio de um Analisador de Redes Vetorial (VNA), permitindo a caracterização dielétrica do material. Os principais resultados esperados incluem o aumento da estabilidade térmica, redução da tangente de perdas e melhoria na condutividade dielétrica, tornando o material mais eficiente para aplicações em micro-ondas.

Dessa forma, este trabalho tem como objetivo a produção e caracterização de ferritas de níquel com diferentes teores de cobalto, avaliando sua resposta eletromagnética em aplicações de micro-ondas por meio da análise de permissividade elétrica e tangente de perdas.

2. DESENVOLVIMENTO

A seguir, são apresentados os principais fundamentos teóricos relacionados ao desenvolvimento deste estudo.

2.1. Ferrita de Níquel

As ferritas são materiais cerâmicos ferromagnéticos compostos principalmente por óxido de ferro e outros metais como zinco, manganês ou níquel. Elas possuem alta permeabilidade magnética e baixa condutividade elétrica, o que as torna ideais para aplicações em componentes eletrônicos.

Várias características de desempenho das ferritas são necessárias para aplicações variadas. As mais esperadas são: alta permeabilidade, alta saturação magnética, alta temperatura de Curie e baixa perda por histerese. É impossível um tipo de ferrita possuir todas estas características, de modo que o tipo de ferrita é escolhido em função do desempenho mais importante. As vantagens das ferritas usadas em sistemas eletrônicos são: alta resistividade eletrônica em relação aos metais, fácil prensagem em matriz, estabilidade química e baixo custo [2].

2.2. Ferritas e suas aplicações em dispositivos de micro-ondas

Ferritas são materiais cerâmicos magnéticos compostos principalmente por óxidos de ferro, que podem ser combinados com outros metais como níquel, zinco, manganês ou cobalto. Elas possuem propriedades magnéticas exclusivas, como alta permeabilidade magnética e baixa condutividade elétrica, características que se tornam ideais para uma vasta gama de aplicações, especialmente em dispositivos eletrônicos e de micro-ondas.

2.2.1. Propriedades magnéticas das ferritas

As ferritas apresentam características magnéticas específicas, como a permeabilidade magnética, que as tornam eficazes em manipular campos magnéticos em frequências de micro-ondas. Eles também possuem baixas perdas dielétricas, o que significa que a energia de micro-ondas é efetivamente manipulada sem ser dissipada como calor excessivo, tornando-se essencial em várias tecnologias.

A microestrutura das ferritas, incluindo o tamanho dos grãos e a porosidade, também desempenha um papel vital em suas propriedades magnéticas. Controles precisos durante o processamento, como preparação do pó, calcinação e condições de sinterização, permitem a modulação dessas propriedades, otimizando o desempenho em aplicações específicas, como dispositivos de micro-ondas [3].

As propriedades magnéticas de um material dependem das interações entre os spins eletrônicos dos cátions. No caso das ferritas, as interações mais importantes são as interações de supertroca [4]. A figura 1 apresenta a estrutura eletrônica dos orbitais 3d de diferentes metais de transição e seus momentos magnéticos. Esses elementos são essenciais na composição das ferritas, onde os íons metálicos interagem magneticamente por meio do específico da supertroca, mediado pelos ânions de oxigênio.

NºAtômico	Elemento	Estrutura eletrônica do orbital 3d					Momento (m_B)
21	Sc	↑					1
22	Ti	↑	↑				2
23	V	↑	↑	↑			3
24	Cr	↑	↑	↑	↑	↑	5
25	Mn	↑	↑	↑	↑	↑	5
26	Fe	↑↓	↑	↑	↑	↑	4
27	Co	↑↓	↑↓	↑	↑	↑	3
28	Ni	↑↓	↑↓	↑↓	↑	↑	2
29	Cu	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	0

Figura 1. Estrutura eletrônica dos orbitais 3d de diferentes metais de transição.[4-5]

Além disso, a distribuição eletrônica dos íons metálicos nas diferentes sub-redes da estrutura espinélio impacta a anisotropia magnética, a estabilidade térmica e o comportamento em altas frequências. Esse conhecimento é essencial para aperfeiçoar a composição das ferritas, ajustando suas propriedades magnéticas, de forma a potencializar seu desempenho em dispositivos de micro-ondas, sensores de alta precisão e componentes eletrônicos de última geração.

2.2.2. Aplicações em dispositivos de microondas

Em dispositivos de micro-ondas, como isoladores, circuladores, antenas e absorvedores de micro-ondas, as ferritas são usadas para controlar, filtrar e direcionar ondas eletromagnéticas de maneira eficiente. Elas são usadas assim porque podem ser feitas para trabalhar em determinadas frequências, mudando suas propriedades magnéticas para cada uso.

O uso de ferritas em dispositivos de micro-ondas oferece diversas vantagens. Sua capacidade de operar com alta eficiência em frequências elevadas é essencial para sistemas de comunicação avançados. Além disso, sua resistência a interferências e suas propriedades isolantes ajudam a aprimorar tanto a qualidade quanto a confiabilidade dos sistemas de micro-ondas.

2.3. VNA

O VNA (Analisador de Rede Vetorial) é um equipamento essencial utilizado em engenharia elétrica e áreas afins para medir as propriedades de componentes e sistemas em frequências de micro-ondas, geralmente em intervalos de GHz. O VNA permite analisar como os sinais se comportam dentro de dispositivos e circuitos ao longo de diferentes frequências, fornecendo informações valiosas sobre sua resposta.

Uma das maiores vantagens do VNA é que permite uma correção completa de erros do sistema, no qual compensa os erros sistemáticos nas medidas, o que permite uma medição com a maior precisão possível [6].

A análise dos dados obtidos pelo VNA não apenas permite compreender melhor o comportamento eletromagnético da ferrita, mas também possibilita ajustes na composição do material para melhorar suas propriedades. A partir disso, foram extraídos valores de permissividade dielétrica e tangente de perdas, fundamentais para avaliar a adequação do material em aplicações de telecomunicações e dispositivos de micro-ondas.

2.3.1. Antenas Ressoradoras Dielétricas (*Dielectric Resonator Antennas - DRA*)

As antenas ressoadoras dielétricas (DRAs) são antenas feitas com esses materiais magnéticos tendo dimensões reduzidas, e concentram o sinal eletromagnético recebido ou enviado, apresentando pequenas perdas por histerese, sendo hoje uma das aplicações mais estudadas e pesquisadas no meio acadêmico [8].

Do ponto de vista físico, as DRAs são corpos cerâmicos com constante dielétrica suficientemente alta para sustentar uma onda eletromagnética no seu interior, no qual uma frequência estacionária definida é acomodada entre as interfaces do sólido dielétrico e o ar [9].

A caracterização dielétrica das amostras foi realizada por meio da análise de DRA em uma faixa de frequências de 1 a 5 GHz. Esse método permite a obtenção precisa de parâmetros como a permissividade dielétrica e a tangente de perdas, fundamentais para avaliar o desempenho dos materiais em aplicações de telecomunicações. A técnica consiste em inserir a amostra em uma cavidade ressonante e medir a variação da frequência de ressonância e do fator de qualidade, possibilitando a extração dos parâmetros dielétricos. A análise foi conduzida considerando a influência da dopagem com cobalto, visando compreender seu impacto sobre as propriedades eletromagnéticas do material.

2.3.2. Permissividade elétrica (ϵ)

A permissividade elétrica de um material é uma medida de sua capacidade de permitir a passagem de um campo elétrico. Em um VNA, a permissividade elétrica pode ser determinada a partir da medição da constante de propagação e da impedância de onda em um determinado material.

É uma propriedade que descreve a resposta de um material à presença de um campo elétrico e é expressa como uma constante dielétrica relativa [7].

A caracterização da permissividade elétrica foi realizada utilizando um Analisador de Redes Vetorial (VNA) e a técnica de Antena Ressoradora Dielétrica (DRA), abrangendo a faixa de frequências de 1 a 5 GHz. A partir das proporções dos parâmetros de espalhamento, foram extraídos os valores da permissividade elétrica (ϵ') e da tangente de perdas ($\tan \delta$), permitindo a análise do impacto da dopagem com cobalto nas propriedades dielétricas do material.

2.4. Materiais e métodos

Nesse tópico, serão apresentados os materiais utilizados na produção das ferritas, os procedimentos usados e o método de caracterização aplicado para o estudo das propriedades magnéticas e elétricas das ferritas de níquel com ferrita de cobalto.

Para melhor compreensão das etapas envolvidas na síntese e caracterização da ferrita de níquel dopada com ferrita de cobalto, apresenta-se, a seguir, um fluxograma resumindo o procedimento adotado. Esse diagrama fornece uma visão geral do processo, permitindo uma compreensão estruturada antes da descrição detalhada de cada etapa.

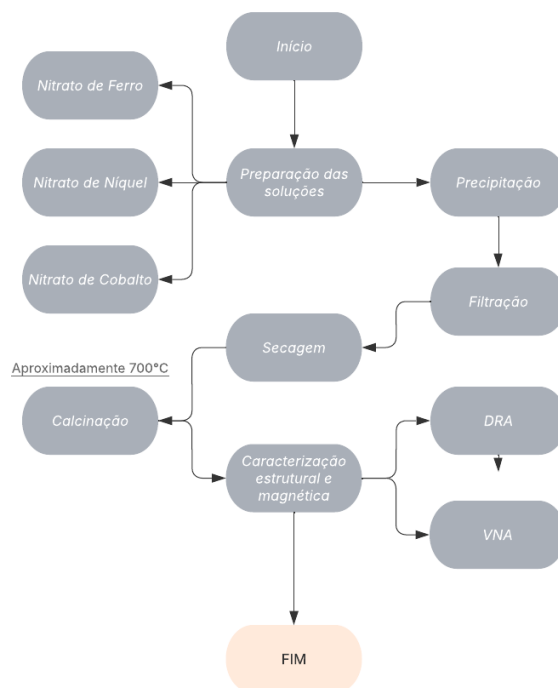


Figura 2. Etapas do processo experimental. (Autoria própria)

As ferritas de níquel-cobalto foram sintetizadas utilizando o método de coprecipitação, uma técnica extremamente empregada na produção de materiais magnéticos devido ao controle preciso sobre a estequiometria e homogeneidade dos produtos obtidos. Esse método envolve a dissolução de precursores metálicos em solução aquosa e a posterior coprecipitação controlada de íons metálicos em meio alcalino.

Para a ferrita de níquel, foram preparadas amostras de níquel puro (100% Ni), 5% de cobalto (em peso em relação ao níquel) e 10% de cobalto (também em peso em relação ao níquel), conforme a Figura 2.

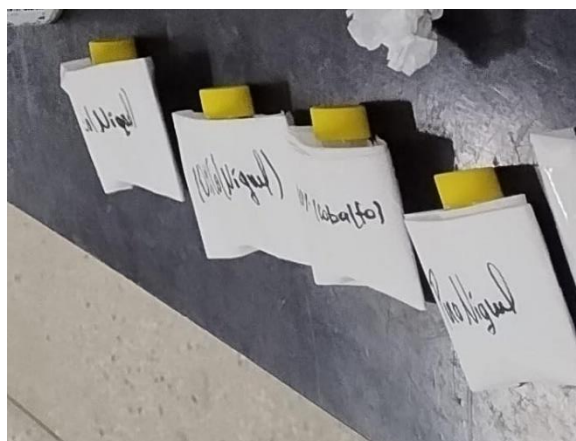


Figura 3. Amostras das ferritas – Ni puro, 5% e 10% de Co. (Autoria própria)

Inicialmente, os nitratos de níquel (Ni^{2+}), cobalto (Co^{2+}) e ferro (Fe^{3+}) foram distribuídos em uma solução ácida de baixa concentração, garantindo uma distribuição homogênea dos íons metálicos. Em seguida, um agente precipitante foi adicionado gota a gota, sob agitação constante, promovendo a coprecipitação dos hidróxidos correspondentes. A Tabela 1, a seguir, mostra as quantidades dos reagentes que foram utilizadas.

Substância	Quantidade	Massa molar (g/mol)
Nitrato de Níquel ($\text{Ni}(\text{NO}_3)_2$)	1,2404 g	183,70
Nitrato de Cobalto ($\text{Co}(\text{NO}_3)_2$)	1,2404 g	182,943
Nitrato de Ferro $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$	3,4437 g	241,86
Quitosana	1,17 g	-
Solução de Ácido Acético	58,55 mL	-

Depois que o precipitado se formou, o material foi direcionado para um processo de filtragem a vácuo, com o objetivo de separar os hidróxidos da fase líquida. Essa etapa é essencial para a remoção de íons residuais da solução, que poderiam interferir na pureza e nas propriedades finais da ferrita.

O precipitado obtido foi então transferido para uma estufa a 150°C, onde ocorreu por 24 (vinte e quatro) horas. Esse processo serviu para remover toda a umidade residual, garantindo que o material ficasse completamente seco e pronto para as próximas etapas.

Os mesmos procedimentos foram aplicados tanto para a síntese da ferrita de níquel (NiFe_2O_4) quanto para a ferrita de cobalto (CoFe_2O_4), garantindo uniformidade na metodologia. A única diferença entre os processos é que, para a síntese da ferrita de níquel foi utilizado nitrato de níquel ($\text{Ni}(\text{NO}_3)_2$), enquanto que, para a ferrita de cobalto, o nitrato de cobalto ($\text{Co}(\text{NO}_3)_2$) foi empregado como precursor metálico.

A figura 3 ilustra a aparência do material antes da secagem, evidenciando sua morfologia e distribuição de partículas.



Figura 3. Ferrita antes da secagem. (Foto cedida por Livia Cabral Maia)

Posteriormente, as amostras foram submetidas a um processo de prensagem em uma prensa hidráulica em 5 toneladas, conforme ilustrado nas figuras 4 e 5. Essa etapa tem como objetivo compactar o material, abrindo espaço entre as redes cristalinas e, consequentemente, aumentando sua densidade e estabilidade estrutural. A pressão aplicada durante esse processo é crucial, pois, quanto maior a pressão, menor o espaço da rede cristalina contribuindo para a melhoria das propriedades magnéticas e elétricas da ferrita.



Figura 4. Prensa hidráulica - Hydraulic Press. (Autoria própria)



Figura 5. Prensa hidráulica, 5 TON. (Autoria própria)

Após a prensagem, as amostras foram distribuídas para um forno mufla, onde foram submetidas a uma calcinação a aproximadamente 700°C. A calcinação no forno mufla tem como objetivo estabilizar a estrutura cristalina da ferrita, já que o material, ao ser retirado da prensa, pode apresentar fragilidade, tornando-se quebradiço ou mole. Esse processo térmico promove a consolidação da estrutura, garantindo maior resistência e homogeneidade do material.

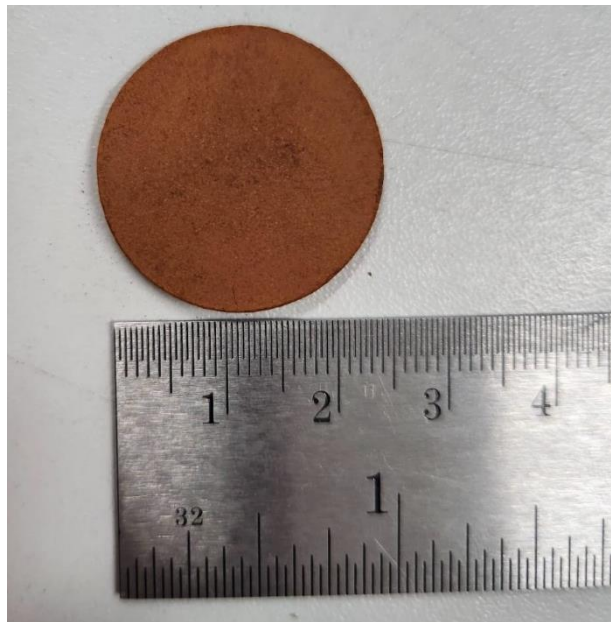


Figura 6. Ferrita de níquel (DRA) puro após a remoção da matriz. (Autoria própria)

2.5. Resultados e Discussões

A figura 6 mostra a análise da permissividade das ferritas com relação a frequência (GHz), apresentando a variação da permissividade real (ϵ') em função da frequência para a ferrita de níquel puro e suas versões com 5% e 10% de cobalto. Observa-se que a ferrita de níquel puro apresenta os maiores valores de ϵ' , enquanto a adição de cobalto reduz essa propriedade de forma sistemática.

Essa redução na permissividade com o aumento da dopagem pode estar associada às modificações na estrutura eletrônica e na interação entre os íons metálicos, que afetam a polarização do material. Além disso, percebe-se que todas as amostras mantêm uma relativa estabilidade da permissividade ao longo da faixa de frequência comprovada, com exceção de uma perturbação de nível em torno de 2 GHz na amostra pura, possivelmente relacionada a efeitos ressonantes internos.

Esses resultados indicam que a aplicação de cobalto pode ser um fator de ajuste na resposta dielétrica do material, tornando-o mais adequado para aplicações específicas em micro-ondas, dependendo das especificações do dispositivo.

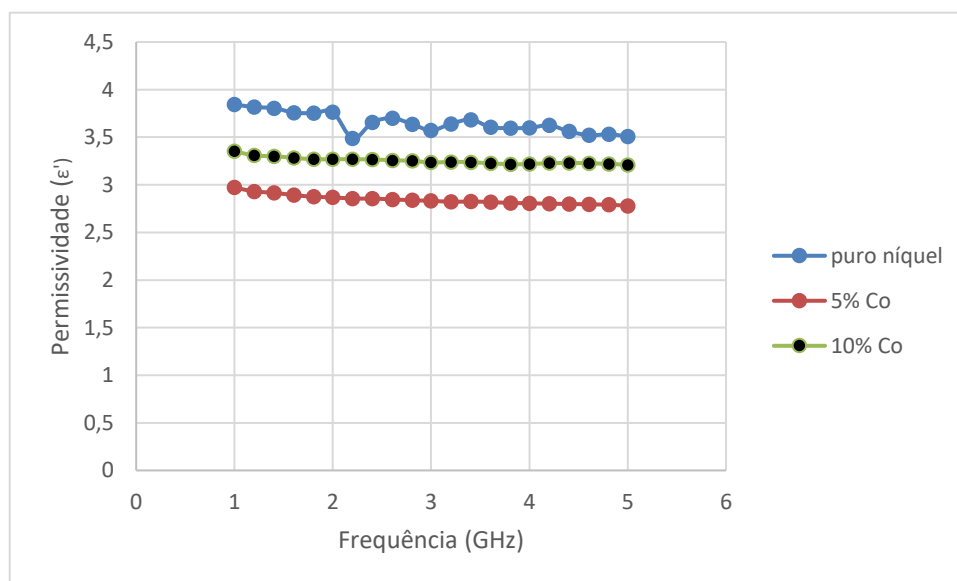


Figura 6. Análise da permissividade das ferritas. (Autoria própria)

A Figura 7 ilustra o comportamento da tangente de perdas dielétricas ($\tan \delta$) em função da frequência para a ferrita de níquel puro e suas versões com 5% e 10% de cobalto. Observa-se que a aplicação influencia significativamente as perdas dielétricas do material, com a amostra contendo 5% de Co apresentando os maiores

valores de $\tan \delta$ em toda a faixa de frequência.

A ferrita de níquel puro apresenta um comportamento intermediário, enquanto a amostra com 10% de Co apresenta as menores perdas dielétricas. Essa redução pode estar associada a uma menor condução de cargas parasitas e a uma alteração na estrutura da rede cristalina, diminuindo os mecanismos de dissipação de energia.

Além disso, todas as amostras demonstram uma tendência de diminuição da tangente de perda com o aumento da frequência, o que sugere uma menor dissipação de energia em faixas mais altas do espectro de micro-ondas. Esse comportamento é interessante para aplicações onde a eficiência energética e a estabilidade dielétrica são fatores críticos no desempenho do material.

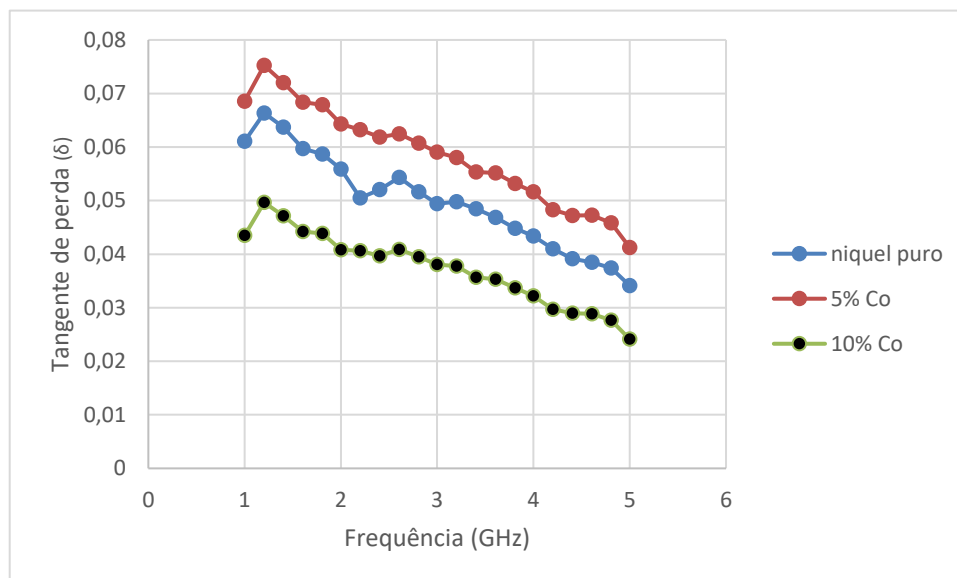


Figura 7. Análise da tangente de perda das ferritas. (Autoria própria)

3. CONCLUSÕES

Os resultados confirmam que a aplicação com cobalto altera significativamente as características do material, influenciando sua permissividade elétrica, tangente de perda e estabilidade em diferentes frequências. Foi constatado que o aumento da concentração de cobalto reduz a permissividade do material e a tangente de perdas, tornando-o mais adequado para aplicações que exigem menores perdas dielétricas.

A microestrutura das ferritas desempenha um papel fundamental na modulação de suas propriedades, reforçando a importância do controle rigoroso dos processos de síntese e sinterização. O estudo também destaca o potencial da ferrita de níquel com a adição do cobalto como material promissor para aplicações em micro-ondas, especialmente na fabricação de componentes de alta eficiência para telecomunicações e sensores de alta frequência.

Os resultados obtidos neste estudo são de grande importância, pois demonstram como a dopagem com cobalto pode ser utilizada para ajustar as propriedades dielétricas e magnéticas das ferritas de níquel, tornando-as mais adequadas para aplicações específicas em micro-ondas.

4. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] VIEIRA, D.A. Síntese por energia de microondas de ferritas Ni-Zn: 2009. 24p. Dissertação (Pós-Graduação) – Universidade Federal de Campina Grande, PB.
- [2] SANTOS, J.G. Síntese da ferrita de Ítrio-Disprósio-Gadolínio por mistura de óxidos para aplicações nas frequências de microondas: 108p. Tese (Pós-Graduação de Engenharia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- [3] COSTA, A.C.F.M., KIMINAMI, R.H.G.A., MORELLI, M.R. Microestrutura e propriedades magnéticas de ferritas Ni-Zn-Sm. Departamento de Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Campina Grande.
- [4-5] CARVALHO, D.G. Propriedades magnéticas de nanopartículas de ferritas mistas de manganês e zinco. Tese (Doutorado), Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro.
- [6] SILVA, M.F. Ressonância ferromagnética de banda larga para o estudo de relaxação em nanoestruturas magnéticas. Dissertação (Pós-Graduação em Física) – Universidade Federal de Pernambuco.
- [7] GOES, P. Entendendo a permissividade dielétrica: o papel dos materiais isolantes na eletricidade. Disponível em: <https://dicionariodopetroleo.com.br/permissividade-dieletrica/>. Acesso em: 03/03/2025.
- [8] JÚNIOR, G.F.M.P. Estudo de propriedades dielétricas e magnéticas da hexaferrita $\text{Ba}_2\text{Co}_2\text{Fe}_{12}\text{O}_{22}(\text{Co}_2\text{Y})$ adicionadas com PbO e Bi_2O_3 para aplicação em dispositivos de RF e microondas. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Ceará.

