



**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SISTEMAS DE
COMUNICAÇÃO E AUTOMAÇÃO**

Kaíck Viana de Oliveira Castro

**ANTENAS DE MICROFITA SOBRE SUBSTRATO DE
FERRITA DE NÍQUEL DOPADAS COM ZINCO**

Mossoró-RN

2018

KAÍCK VIANA DE OLIVEIRA CASTRO

**ANTENAS DE MICROFITA SOBRE SUBSTRATO DE
FERRITA DE NÍQUEL DOPADAS COM ZINCO**

Dissertação de mestrado acadêmico apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Comunicação e Automação da Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para a obtenção do título de mestre em Sistemas de Comunicação e Automação.

Orientador: Prof. Dr. Idalmir de Souza Queiroz Júnior – UFERSA

Coorientador (a): Prof. Dr. Rodolfo Bezerra da Silva - UERN

Mossoró-RN

2018

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº9.610/1998. O conteúdo desta obra tornar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Biblioteca Central Orlando Teixeira (BCOT)
Setor de Informação e Referência (SIR)

C355a Castro, Kaíck Viana de Oliveira.
ANTENAS DE MICROFITA SOBRE SUBSTRATO DE
FERRITA DE NÍQUEL DOPADAS COM ZINCO / Kaíck Viana
de Oliveira Castro. - 2018.
106 f. : il.

Orientador: Idalmir de Souza Queiroz Júnior .
Coorientador: Rodolfo Bezerra Silva.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Programa de Pós-graduação em
Sistemas de Comunicação e Automação, 2018.

1. Antenas de Microfita. 2. Técnica Sol-Gel.
3. Ferritas. I. Queiroz Júnior , Idalmir de
Souza, orient. II. Silva, Rodolfo Bezerra, co-
orient. III. Título.

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

KAÍCK VIANA DE OLIVEIRA CASTRO

**ANTENAS DE MICROFITA SOBRE SUBSTRATO DE
FERRITA DE NÍQUEL DOPADAS COM ZINCO**

Dissertação de mestrado acadêmico apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Comunicação e Automação da Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para a obtenção do título de mestre em Sistemas de Comunicação e Automação.

APROVADO EM: 22/02/18

BANCA EXAMINADORA




Prof. Dr. Idalmir de Souza Queiroz Júnior - UFERSA/Mossoró



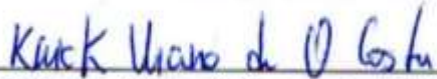
Prof. Dr. Rodolfo Bezerra da Silva - UERN/Mossoró



Prof. Dr. Humberto Dionísio de Andrade - UFERSA/Mossoró



Prof. Dr. José Alzamir Pereira da Costa - UERN/Mossoró



Kaíck Viana de Oliveira Castro (discente) - UFERSA/Mossoró

Mossoró, 22 de Fevereiro de 2018

DEDICATÓRIA

Ao meu pai José Maria de Castro (in memoriam),
que diante de suas limitações, nunca poupou
esforços para permitir que eu seguisse nos estudos.
Tudo o que sou devo a você. Hoje eu só queria um
abraço e dizer muito obrigado...

À Maria de Fátima Viana de Oliveira
Castro, minha mãe, que sempre me ama
incondicionalmente.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pelas oportunidades oferecidas, que possibilitaram meu engrandecimento.

Agradeço a minha família em especial minha mãe, Maria de Fátima Viana de Oliveira Castro, a pessoa mais importante que tenho na vida e dedico todas minhas conquistas a ela.

Agradeço a minha parceira de todos os momentos Úrsula Karine Gonçalves Holanda, pela compreensão e apoio.

Agradeço a meu orientador Prof. Dr. Idalmir de Souza Queiroz Júnior pelos ensinamentos, compreensão, humildade, paciência e amizade de um amigo sem perder a autoridade e competência de um excelente orientador.

Agradeço a meu coorientador Prof. Dr. Rodolfo Bezerra da Silva por todo o apoio e tempo disponibilizado para os ensinamentos necessários para a realização deste trabalho.

Agradecimento especial a Ernani Silva, pela sua dedicação, paciência e companhia em praticamente todas as etapas experimentais. Sem a sua ajuda este trabalho seria muito mais difícil.

Agradeço aos professores Dr. Humberto Dionísio e Me. Isaac Barros pelos momentos em que sanaram diversas dúvidas minhas e pelos momentos de descontração e alegria no laboratório.

Aos meus amigos Arimateia Pinto, Samanta Holanda, Anamaria Sena, Juan Rafael, Flávia Dantas, Alexandre Henrique, Alexandre Araújo, Diego Pires, Thomas Tadeu, Bruno Marcel, Talles Amony, Magno Monteiro, Arthur Emily, Thalita Faheina, Eduardo Chaves, que foram responsáveis por diversos momentos de alegria e me ajudaram em diversos momentos na trajetória deste trabalho. Sinto muita felicidade em ter tido a oportunidade de compartilhar momentos maravilhosos com todos vocês.

EPÍGRAFE

O sucesso é ir de fracasso em fracasso sem
perder entusiasmo. (Winston Churchill)

RESUMO

As antenas de microfita têm um potencial que só foi inicialmente estudado em 1953, para receber mais atenção somente na década de 1970. Desde então foram desenvolvidas diversas técnicas, métodos de análises, algoritmos, e materiais com o intuito de estudar, compreender e produzir estas antenas. Vantagens como custo baixo, pequenas dimensões, baixo peso e volume, formato aerodinamicamente vantajoso, possibilidade de ter formato plano ou curvo fizeram desta antena uma das mais interessantes para a área militar, e agora para a área comercial e industrial. Este trabalho visou o desenvolvimento de substratos para as antenas de microfita utilizando Ferritas do tipo Ni-Zn através da técnica de Sol-Gel, um processo físico-químico que permite a obtenção de partículas nanométricas, tendo em vista a facilidade de execução dessa técnica. Os experimentos consistiram na produção de três tipos de pastilhas de Ferritas, NiFe_2O_4 , ZnFe_2O_4 e $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ em que essas pastilhas foram utilizadas como substratos das antenas de microfita. Em seguida, foi realizado simulações, por meio do *software* comercial HFSS[®], com o objetivo de verificar a influência das propriedades magnéticas do material em parâmetros das antenas como perda de retorno, largura de banda, carta de Smith. Os resultados simulados foram divididos em grupos chamados de dielétrico e padrão, no qual esses grupos se diferenciavam no tocante a presença ou não das características magnéticas do material. Todos os resultados foram comparados com os valores medidos e analisados verificando alguns efeitos como a redução da frequência de ressonância das antenas.

Palavra-Chave: Antenas de Microfita, Técnica Sol-Gel, Ferritas.

ABSTRACT

Microstrip antennas have a potential that was only initially studied in 1953, to receive more attention only in the 1970s. Since then, several techniques, methods of analysis, algorithms, and materials have been developed to study, understand and produce these antennas. Advantages such as low cost, small dimensions, low weight and volume, aerodynamically advantageous format, possibility to have flat or curved format made this antenna one of the most interesting for the military area, and now for commercial and industrial area. This work has as objective at the development of substrates for microstrip antennas using Ni-Zn-type Ferrites using the Sol-Gel technique, a physicochemical process that allows the obtaining of nanometric particles, in view of the ease of execution of this technique. The experiments consisted in the production of three types of ferrites, NiFe_2O_4 , ZnFe_2O_4 and $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ in which these pellets were used as substrates of the microstrip antennas. Then, simulations were carried out using commercial HFSS software to verify the influence of the magnetic properties of the material on antenna parameters such as return loss, bandwidth, and Smith's chart. The simulated results were divided into groups called dielectric and standard, in which these groups differed in the presence or absence of the magnetic characteristics of the material. All the results were compared with the values measured and analyzed by verifying some effects such as the reduction of the resonance frequency of the antennas.

Key Words: Microstrip Antennas, Sol-Gel Technique, Ferrites.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Permeabilidade Magnética (μ') de ferritas do tipo $\text{Ni}_{0,5}\text{Zn}_{0,5}\text{Fe}_2\text{O}_4$	44
Tabela 2: Constante dielétrica (ϵ') de ferritas do tipo $\text{Ni}_{0,5}\text{Zn}_{0,5}\text{Fe}_2\text{O}_4$	45
Tabela 3: Quantidade de reagentes necessário para produzir 30g de cada ferrita.	55
Tabela 4: Dimensões das antenas projetas com diferentes pastilhas de ferritas.....	79
Tabela 5: Valores resumidos simulados e medidos das antenas de microfita	95
Tabela 6: Ferritas produzidas	104
Tabela 7: Reagentes utilizados na técnica Sol-Gel.....	105

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Antena de Microfita	18
Figura 2: Formatos de patch	19
Figura 3: Diagramas de radiação de uma antena de microfita. (a) diagrama 2D e (b) diagrama 3D	21
Figura 4: Modelo de Quadripolo	24
Figura 5: Gráfico da perda de retorno	26
Figura 6: Perdas de reflexão, de condução e dielétricas.....	27
Figura 7: Alimentação com Linha de Microfita	29
Figura 8: Alimentação por Cabo Coaxial.....	30
Figura 9: Alimentação via acoplamento por abertura	31
Figura 10: Alimentação via acoplamento por proximidade	31
Figura 11: Modelo da Cavidade Ressonante	33
Figura 12: Distribuição de carga e densidade de corrente num patch.....	34
Figura 13: Efeito de frajamento numa antena de microfita (a) Vista isométrica e (b) Vista frontal	36
Figura 14: Célula unitária de uma estrutura espinélio do tipo AB_2O_4	39
Figura 15: Estrutura Cristalina do $NiFe_2O_4$	42
Figura 16: Estrutura Cristalina do $ZnFe_2O_4$	43
Figura 17: Feixes de raios X incidente e difratado.....	46
Figura 18: Sistema do Difrátômetro	47
Figura 19: Exemplo de difratograma de raios X de $CuFe_2O_4$	47
Figura 20: Microscópio Eletrônico de Varredura - MEV.....	49
Figura 21: Analisador de Rede Vetorial (Sonda Coaxial).....	50
Figura 22: Fluxograma dos processos utilizados.....	53
Figura 23: Fluxograma da síntese das ferritas	54
Figura 24: Secagem da solução aquosa no agitador magnético.	56
Figura 25: Maceração	56
Figura 26: Forno tipo mufla.....	57
Figura 27: Amostras de Ferritas.	57
Figura 28: Difrátômetro de Raios X do LAMOp	58
Figura 29: Microscópio Eletrônico de Varredura.....	59

Figura 30: Analisador de Redes Vetoriais - Rohde & Schwarz ZNB4.	60
Figura 31: Prensa Hidráulica.	61
Figura 32: Pastilhador de 20mm de diâmetro.	61
Figura 33: Forno Tubular (a) Vista externa, (b) Vista interna.	62
Figura 34: Pastilhas Sinterizadas de Ferritas.	63
Figura 35: Folha de Cobre: 0,05mm de espessura.	65
Figura 36: Conector SMA-KE.	66
Figura 37: Antenas de Microfita com substrato de Ferrita.	67
Figura 38: Analisador Redes Vetoriais Agilent Technologies E5071C.	68
Figura 39: Difratoograma da $NiFe_2O_4$	69
Figura 40: Difratoograma da $ZnFe_2O_4$	70
Figura 41: Difratoograma da $Ni_{0,5}Zn_{0,5}Fe_2O_4$	70
Figura 42: Imagens obtida por MEV da $NiFe_2O_4$ (a) Escala 10 μ m (b) Escala 5 μ m.	71
Figura 43: Imagens obtida por MEV da $ZnFe_2O_4$ (a) Escala 10 μ m (b) Escala 5 μ m.	72
Figura 44: Imagens obtida por MEV da $Ni_{0,5}Zn_{0,5}Fe_2O_4$ (a) Escala 10 μ m (b) Escala 5 μ m	72
Figura 45: Permissividade elétrica da $NiFe_2O_4$	73
Figura 46: Permissividade elétrica da $ZnFe_2O_4$	74
Figura 47: Permissividade elétrica da $Ni_{0,5}Zn_{0,5}Fe_2O_4$	75
Figura 48: Permeabilidade Magnética da $NiFe_2O_4$ (a) Real, (b) Imaginária.	76
Figura 49: Permeabilidade Magnética da $ZnFe_2O_4$	77
Figura 50: Permeabilidade Magnética da $Ni_{0,5}Zn_{0,5}Fe_2O_4$ a) Real, b) Imaginária.	78
Figura 51: Perda de retorno simulado da antena de $NiFe_2O_4$	80
Figura 52: Diagrama de Radiação 2D e 3D das antenas de $NiFe_2O_4$ (a) Dielétrico, (b) Padrão na frequência 10,71 GHz e 7,919 GHz, respectivamente.	81
Figura 53: Densidade de corrente das antenas de $NiFe_2O_4$ (a) Dielétrico, (b) Padrão. na frequência 10,71 GHz e 7,919 GHz, respectivamente.	82
Figura 54: Perda de retorno simulado da antena de $ZnFe_2O_4$	83
Figura 55: Diagrama de Radiação 2D e 3D das antenas de $ZnFe_2O_4$ (a) Dielétrico, (b) Padrão para as frequências 10,357 GHz e 5,022 GHz, respectivamente.	84
Figura 56: Densidade de corrente das antenas de $ZnFe_2O_4$ (a) Dielétrico, (b) Padrão nas frequências 10,357 GHz e 5,022 GHz, respectivamente.	85
Figura 57: Perda de retorno simulado da antena de $Ni_{0,5}Zn_{0,5}Fe_2O_4$	86

Figura 58: Diagrama de Radiação 2D e 3D das antenas de $\text{Ni}_{0,5}\text{Zn}_{0,5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ (a) Dielétrico, (b) Padrão nas frequências 10,427 GHz e 5,552 GHz, respectivamente.	87
Figura 59: Densidade de corrente das antenas de $\text{Ni}_{0,5}\text{Zn}_{0,5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ (a) Dielétrico, (b) Padrão nas frequências 10,427 GHz e 5,552 GHz, respectivamente.	88
Figura 60: Comparação da perda de retorno da antena de NiFe_2O_4	89
Figura 61: Carta de Smith medida da antena NiFe_2O_4	90
Figura 62: Comparação da perda de retorno da antena de ZnFe_2O_4	91
Figura 63: Carta de Smith medida da antena ZnFe_2O_4	92
Figura 64: Comparação da perda de retorno da antena de $\text{Ni}_{0,5}\text{Zn}_{0,5}\text{Fe}_2\text{O}_4$	93
Figura 65: Carta de Smith medida da antena $\text{Ni}_{0,5}\text{Zn}_{0,5}\text{Fe}_2\text{O}_4$	94

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	16
1.2. OBJETIVOS GERAIS	17
1.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
2. ANTENAS	18
2.2. ANTENAS DE MICROFITA	18
2.3. PARÂMETROS DE ANTENAS.....	20
2.3.1. Diagrama de Radiação.....	20
2.3.2. Diretividade e Ganho.....	21
2.3.3. Perda de Retorno	23
2.3.4. Largura de Banda (BW)	25
2.3.5. Eficiência de Antenas	27
2.4. MÉTODOS DE ALIMENTAÇÃO	28
2.4.1. Linha de Microfita	28
2.4.2. Cabo Coaxial	29
2.4.3. Acoplamentos por Abertura	30
2.4.4. Acoplamentos por Proximidade	31
2.5. MÉTODOS DE ANÁLISE.....	32
2.5.1. Modelo da Cavidade.....	33
2.5.2. Modelo da Linha de Transmissão.....	36
3. ESTRUTURA ESPINÉLIO – FERRITAS	39
3.2. FERRITA DE NÍQUEL (NiFe_2O_4)	41
3.3. FERRITA DE ZINCO (ZnFe_2O_4).....	42
3.4. FERRITA NI-ZN	44
4. TÉCNICAS DE CARACTERIZAÇÃO	45
4.2. DIFRAÇÃO DE RAIO X (DRX).....	45

4.3.	MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)	48
4.4.	MEDIDAS ELÉTRICAS E MAGNÉTICAS	49
5.	MATERIAIS E MÉTODOS	53
5.2.	SÍNTESE DAS FERRITAS.....	54
5.3.	CARACTERIZAÇÃO	58
5.3.1.	Estrutura Cristalina.....	58
5.3.2.	Caracterização das Propriedades Elétrica.....	59
5.4.	FABRICAÇÃO DAS PASTILHAS, PROJETO E SIMULAÇÃO	60
5.5.	IMPLEMENTAÇÃO E TESTES	64
6.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	69
6.2.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	69
6.2.1.	Caracterizações Estruturais.....	69
6.2.2.	Caracterizações Elétrica e Magnética.....	73
6.2.3.	Projeto e Simulações	78
6.2.4.	Comparação das simulações com os valores medidos.	88
7.	CONCLUSÕES.....	96
	REFERÊNCIAS	98
	ANEXO I.....	104

1. INTRODUÇÃO

Com o desenvolvimento cada vez mais crescente das telecomunicações, principalmente a de dispositivos móveis, necessita-se cada vez mais de dispositivos que não causem interferência e sejam mais imunes a ruídos. Nesse contexto, surge a necessidade do estudo de antenas que é o equipamento fundamental para transmissão e recepção de sinais de ondas eletromagnéticas (BALANIS, 2005).

Antenas que possuem tamanho reduzido são de fundamental importância para aplicações em sistemas de comunicação portátil, como por exemplo os satélites de posicionamento global (GPS). Diante disto, a utilização de estruturas planares, como as antenas de microfita, desenvolvidas na década de 1950 por George A. Deschamps (DESCHAMPS, 1953), ganharam bastante relevância devidos suas características a facilidade de fabricação, baixo custo, pequenas dimensões e capacidade de adaptação em superfícies planas ou curvas.

Existe a constante procura por materiais que possuam características elétricas e magnéticas que permitam a miniaturização desses tipos de antenas. Materiais com alto valores de permissividade elétrica influenciam diretamente na redução dimensional das antenas de microfita, permitindo aplicações em sistemas embarcados onde os espaços disponíveis são cada vez menores (OLIVEIRA, 2008).

Nessa perspectiva, como as ferritas possuem propriedades dielétrica e magnética, é esperado que o tamanho da antena seja reduzido (DAS; CHOWDHURY, 1980). Ferritas são materiais cerâmicos e caracterizados magneticamente como ferrimagnéticos mole, como as do tipo Ni-Zn (SHINDE; GADKARI; VASAMBEKAR, 2013) possuindo propriedades de alta resistividade, baixas perdas dielétricas e dureza mecânica. Existe diversas técnicas para produção do pó de ferritas, entre eles, reação por combustão, Pechini, Citrato Gel e Sol-Gel (KOOTI; SEDEH, 2013)

No presente trabalho será apresentado a utilização de ferritas do tipo NiFe_2O_4 , ZnFe_2O_4 e $\text{Ni}_{0,5}\text{Zn}_{0,5}\text{Fe}_2\text{O}_4$, produzidas através da técnica Sol-Gel, como substrato em antenas de microfita e verificar suas influências nos parâmetros das antenas: perda de retorno, impedância de entrada e densidade de corrente.

1.2.OBJETIVOS GERAIS

- Desenvolver três antenas de microfita com substrato de ferrita de NiFe_2O_4 , ZnFe_2O_4 e $\text{Ni}_{0,5}\text{Zn}_{0,5}\text{Fe}_2\text{O}_4$.

1.3.OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Estudar os conceitos teóricos relacionado às antenas de microfita;
- Pesquisar algumas características das ferritas utilizadas neste trabalho;
- Aprender a técnica Sol-Gel, utilizada para produção dos pós das ferritas;
- Produzir as ferritas de Zn, Ni e NiZn;
- Analisar o comportamento elétrico das pastilhas de ferritas produzidas;
- Modelar e simular as antenas propostas com suas devidas características elétricas e magnéticas;
- Construir as antenas com as dimensões obtidas na etapa de projeto e simulação;
- Realizar medições dos parâmetros reais das antenas;
- Comparar os resultados simulado e medido em seguida verificar qual o efeito da inserção de materiais magnéticos no substrato das antenas de microfita.

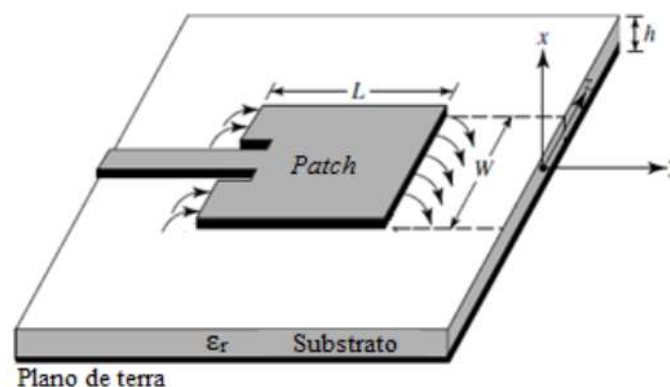
2. ANTENAS

Este Capítulo apresenta conceitos teóricos essenciais para o desenvolvimento do trabalho. Contendo informações sobre as antenas de microfita, suas principais características, estrutura, definição de alguns parâmetros, método de alimentação e análise de projetos.

2.2.ANTENAS DE MICROFITA

As antenas de microfita foram inicialmente propostas por Deschamps (1953), no entanto, pouca atenção foi dada até os anos 1970. A ideia da utilização desse tipo de antena surgiu a partir da utilização de tecnologia de circuitos impressos não apenas em componentes de circuitos e linhas de transmissão, mas também para elementos radiantes em sistemas eletrônicos (LEE, 1989). Essas antenas possuem características interessantes como baixo custo, robustez mecânica, fácil construção e estrutura moldável a superfícies planas e não-planas permitindo aplicações diversas, seja governamental ou comercial. As antenas de microfita são compostas basicamente por um elemento condutor irradiante chamado de *patch* de espessura pequena, muito menor que o comprimento de onda no espaço livre ($t \ll \lambda_0$) (BALANIS, 2005), conforme mostrado na figura 1.

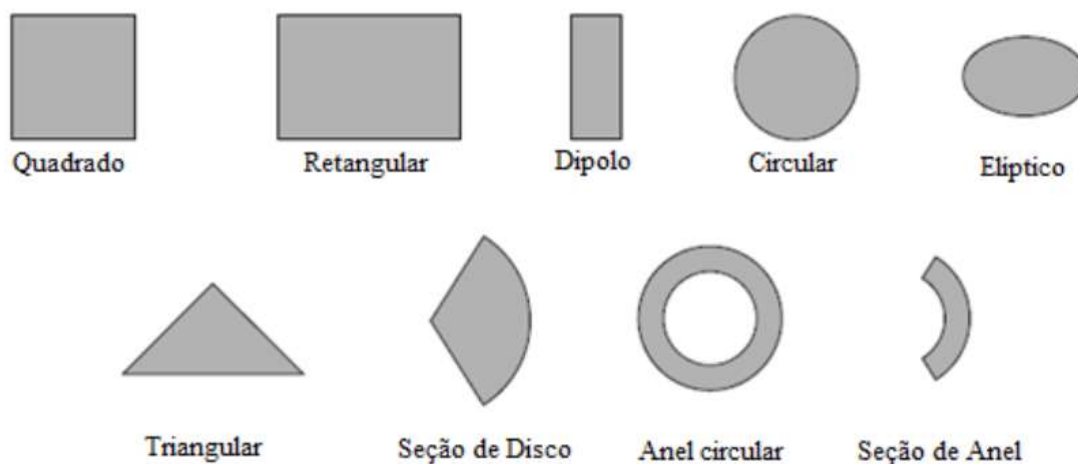
Figura 1: Antena de Microfita



Fonte: Adaptado de BALANIS (2005).

O *Patch* é impresso sobre uma camada de material dielétrico a uma distância h do plano de terra, geralmente entre $0,003\lambda_0 \leq h \leq 0,005\lambda_0$, conforme mostrado na figura 1. O elemento radiante (*patch*) das antenas de microfita, pode assumir diversos formatos, quadrado, retangular, circular, elíptica, triangular ou qualquer outra forma (BALANIS, 2005), ilustrado na figura 2.

Figura 2: Formatos de *patch*



Fonte: Adaptado de BALANIS (2005)

Patch com os formatos quadrados, retangulares, dipolos e circulares são os mais comuns devido a facilidade de análise e fabricação. Semelhante ao *patch*, o plano de terra é composto por uma placa metálica localizada abaixo do substrato da antena com a função refletora, evitando assim a formação de lóbulos traseiros mais intensos, além de servir como estrutura de aterramento (MEDEIROS, 2013).

A camada intermediária entre o *patch* e o plano de terra, é chamada de substrato. Diferentes tipos de materiais são utilizados como substrato, geralmente são materiais com constante dielétrica entre $2,2 \leq \epsilon_r \leq 12$. Substratos com constante dielétrica alta, são desejáveis em aplicações em microondas na qual as antenas possuem pequenas dimensões, porém as perdas nesses substratos são maiores, resultando em largura de banda relativamente pequenas (BALANIS, 2005).

2.3.PARÂMETROS DE ANTENAS

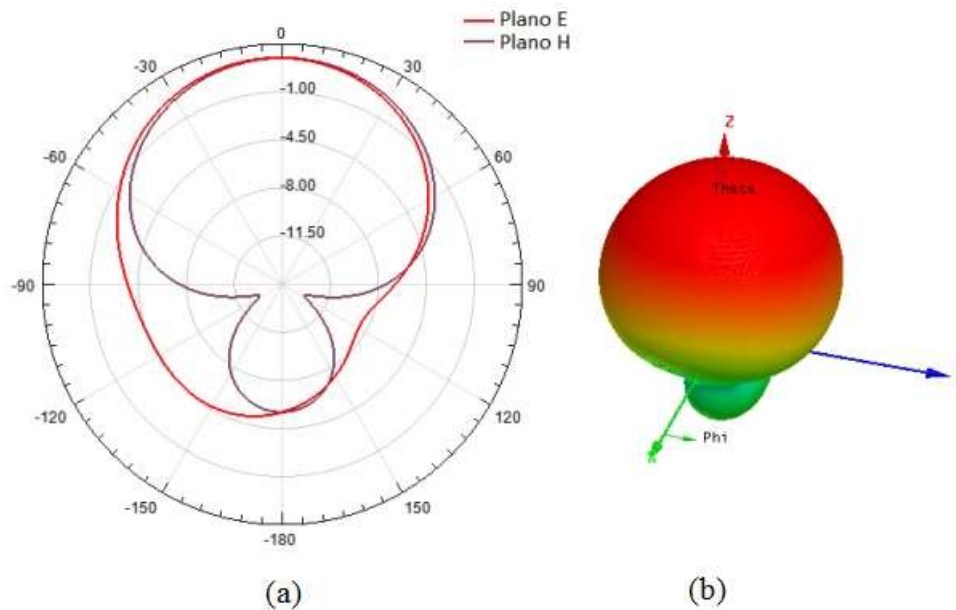
Para descrever o desempenho de antenas, faz-se necessário o estudo de alguns parâmetros importantes que fornecem informações relevantes no desenvolvimento de projetos de antenas. A seguir é apresentado os parâmetros de interesse:

- Diagrama de Radiação;
- Ganho e Diretividade;
- Frequência de Ressonância;
- Largura de Banda (BW);
- Eficiência de Antenas.

2.3.1. Diagrama de Radiação

O diagrama de radiação ou simplesmente diagrama de uma antena é a representação gráfica que apresenta as características de propagação das ondas eletromagnéticas de uma antena em função de coordenadas espaciais. Através do diagrama, obtém-se a informação em que direção o campo ou a potência irradiada pela antena é mais intensa (BALANIS, 2005). A figura 3 mostra um exemplo de diagrama de radiação 2D e 3D de uma antena de microfita.

Figura 3: Diagramas de radiação de uma antena de microfita. (a) diagrama 2D e (b) diagrama 3D



Fonte: Autoria Própria

O diagrama de radiação contém muitas informações úteis sobre as características de radiação da antena, como a largura de feixe de meia potência (LFMP) do lóbulo principal, relação frente-costa que mostra a diretividade da antena, posições nulas, entre outras (HUANG; BOYLE, 2008).

2.3.2. Diretividade e Ganho

A diretividade de uma antena é definida pela *IEEE Standard Definitions of Terms for Antennas* de 2013, como a razão entre intensidade de radiação numa determinada direção e a intensidade média de radiação em todas as direções. Segundo Balanis (2005) a diretividade de uma fonte não-isotrópica é igual à razão entre sua intensidade de radiação em uma dada direção e a intensidade de radiação de uma fonte isotrópica, mostrado na equação 1.

$$D = \frac{U}{U_0} = \frac{4\pi U}{P_{\text{rad}}} \quad (1)$$

Caso a direção não seja especificada, fica implícito a direção de máxima intensidade de radiação, sendo a máxima diretividade expressa como:

$$D_{\text{máx}} = \frac{U_{\text{máx}}}{U_0} = \frac{4\pi U_{\text{máx}}}{P_{\text{rad}}} \quad (2)$$

Sabendo que a intensidade de radiação de uma antena isotrópica é mostrada em (3)

$$U_0 = \frac{P_{\text{rad}}}{4\pi} \quad (3)$$

Onde:

U_0 : intensidade de radiação da fonte isotrópica;

P_{rad} : potência radiada total;

D : diretividade;

U : intensidade de radiação.

Em antenas com componentes ortogonais de polarização, é definido a diretividade parcial de uma antena para uma dada polarização numa dada direção, onde a diretividade total corresponde a soma das diretividades parciais associada a quaisquer polarizações ortogonais (BALANIS, 2005), expresso matematicamente pelas equações (4) a (6).

$$D_0 = D_\theta + D_\phi \quad (4)$$

$$D_\phi = \frac{4\pi U_\phi}{(P_{\text{rad}})_\theta + (P_{\text{rad}})_\phi} \quad (5)$$

$$D_\theta = \frac{4\pi U_\theta}{(P_{\text{rad}})_\theta + (P_{\text{rad}})_\phi} \quad (6)$$

Onde:

D_θ : diretividade parcial na componente θ ;

D_ϕ : diretividade parcial na componente ϕ ;

U_θ : intensidade de radiação em uma dada direção contida na componente de campo θ ;

U_ϕ : intensidade de radiação em uma dada direção contida no componente de campo ϕ ;

$(P_{\text{rad}})_\theta$: potência total radiada em todas as direções contidas no componente de campo θ ;

$(P_{\text{rad}})_\phi$: potência total radiada em todas as direções contidas no componente de campo ϕ .

Segundo Balanis (2005), Ganho é definido como a razão entre a intensidade de radiação, em uma dada direção, e a intensidade de radiação que seria obtida se a potência aceita pela antena fosse radiada isotropicamente. O Ganho é expresso matematicamente pela equação (7)

$$\text{Ganho} = 4\pi \frac{\text{intensidade de radiação}}{\text{potência total de entrada (aceita)}} = 4\pi \frac{U(\theta, \phi)}{P_{\text{in}}} \text{ (adimensional)} \quad (7)$$

Quando a direção não é especificada, o ganho de potência é em geral calculado na direção de máxima radiação.

2.3.3. Perda de Retorno

Em situações onde não existe o casamento de impedância, nem toda energia disponível do gerador é fornecida à carga, gerando uma perda, onde essa perda é chamada de Perda de Retorno (RL) e é medida em dB (POZAR, 2012), onde está expressa pela equação (8).

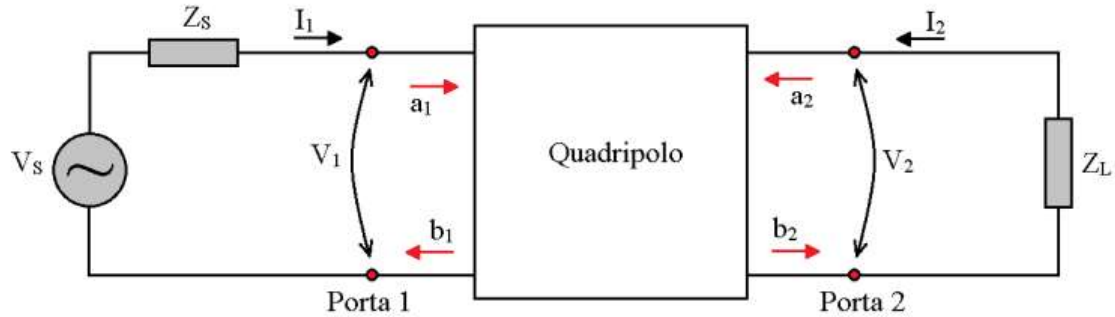
$$\text{RL} = -20 \log |\Gamma| \text{ dB} \quad (8)$$

Uma maneira de obter esse parâmetro é através da matriz de espalhamento (Parâmetros S) onde essa representação é a mais indicada para medições diretas de ondas incidentes, refletidas e transmitidas.

A utilização de quadripolo segundo Anderson (1967), é a técnica mais eficaz e bastante utilizada em circuitos de micro-ondas tendo em vista a facilidade das medições e a possibilidade de aplicação em altas frequências. A figura 4 mostra a representação de quadripolo onde são apresentadas as ondas de tensões complexas normalizadas incidentes

(a_1 e a_2) e refletidas (b_1 e b_2), Z_S é a impedância da fonte geradora do sinal e Z_L a impedância da carga.

Figura 4: Modelo de Quadripolo



Fonte: Holanda (2016)

Com as tensões e correntes de entrada (V_1 e I_1) e saída (V_2 e I_2), as equações dos parâmetros de ondas normalizadas complexas podem ser descritas como:

$$a_1 = \frac{V_1 + Z_0 I_1}{2\sqrt{Z_0}} = \frac{\text{onda de potência incidente em 1}}{2\sqrt{Z_0}} \quad (9)$$

$$a_2 = \frac{V_2 + Z_0 I_2}{2\sqrt{Z_0}} = \frac{\text{onda de potência incidente em 2}}{2\sqrt{Z_0}} \quad (10)$$

$$b_1 = \frac{V_1 - Z_0 I_1}{2\sqrt{Z_0}} = \frac{\text{onda de potência refletida em 1}}{2\sqrt{Z_0}} \quad (11)$$

$$b_2 = \frac{V_2 - Z_0 I_2}{2\sqrt{Z_0}} = \frac{\text{onda de potência refletida em 2}}{2\sqrt{Z_0}} \quad (12)$$

Onde Z_0 representa uma impedância de referência. A partir das equações (9) a (12) é possível obter um sistema de equações lineares representada na forma matricial em (13).

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} \quad (13)$$

Onde:

S_{11} – coeficiente de reflexão da tensão no acesso 1;

S_{22} – coeficiente de reflexão da tensão no acesso 2;

S_{21} – ganho direto de tensão do quadripolo;

S_{12} – isolamento do quadripolo.

De acordo com Anderson (1967) os elementos S_{ij} da matriz são chamados de parâmetros de espalhamento do quadripolo. Com a utilização do elemento S_{11} , também representado pela letra Γ , a equação (8), torna-se:

$$RL = -20 \log |S_{11}| \text{ dB} \quad (14)$$

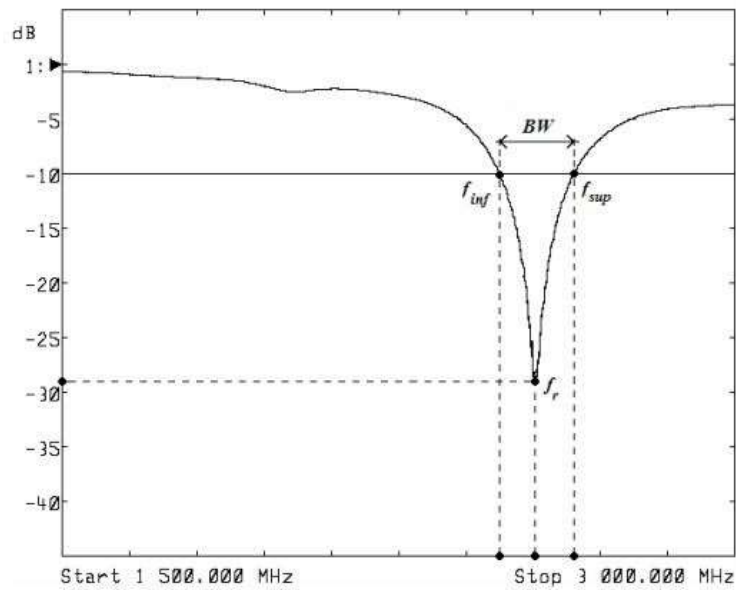
A perda de retorno é um parâmetro muito importante devido a relação da potência refletida com a potência fornecida à carga, onde na prática, os valores aceitáveis estão abaixo de -10dB (SILVA, 2014).

2.3.4. Largura de Banda (BW)

Segundo Balanis (2005), largura de banda (*Bandwidth* – BW) é definido como sendo a faixa de frequência, nos dois lados de uma frequência central, onde as características da antena como: impedância de entrada, diagrama, largura de feixe, polarização, nível de lóbulo secundário, ganho, direção de feixe, possui valores dentro de um limite aceitável.

A frequência de ressonância (f_r) de uma antena corresponde ao valor da frequência onde a perda de retorno está abaixo de -10dB, logo a largura de banda (BW) é a faixa de frequência em torno de sua frequência de operação considerando os extremos do ponto onde a perda de retorno é -10dB (CARNEIRO, 2010). A figura 5 mostra um gráfico de perda de retorno em função da frequência juntamente com a largura de banda (BW).

Figura 5: Gráfico da perda de retorno



Fonte: Carneiro (2010)

Logo, a largura de banda (BW) pode ser calculada realizando a diferença entre a frequência superior (f_{sup}) e inferior (f_{inf}) onde BW é medida, matematicamente por:

$$BW = f_{sup} - f_{inf} \quad (15)$$

Na prática, a largura de banda das antenas é classificada de duas maneiras: banda estreita e banda larga. O seu valor percentual é calculado com base nos valores da frequência superior e inferior em relação a frequência de operação (GHAVAMI, 2004), mostrado na equação (16).

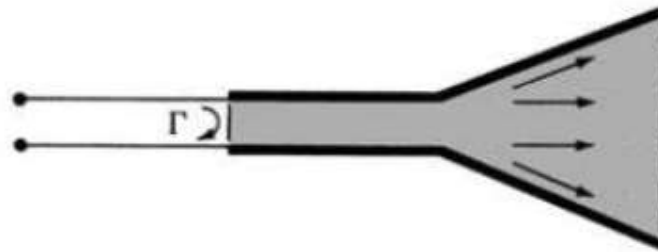
$$BW = \frac{f_{sup} - f_{inf}}{f_c} * 100\% \quad (16)$$

Com os valores em percentual da largura de banda das antenas, pode-se classificar as antenas como: Banda Estreita ($0\% < BW < 1\%$), Banda Larga ($1\% \leq BW \leq 20\%$) e Banda Ultra Larga ($BW \geq 20\%$) (FILHO, 2010).

2.3.5. Eficiência de Antenas

A eficiência de uma antena pode ser calculada através da associação de um conjunto de perdas presentes numa antena, mostrada na figura 6.

Figura 6: Perdas de reflexão, de condução e dielétricas



Fonte: Adaptado de Balanis (2005)

A eficiência total (η_0) leva em consideração as perdas nos terminais de entrada e no interior da estrutura da antena (BALANIS, 2005). Tais perdas podem ser:

- Reflexão ocasionadas pelo descasamento de impedância
- Perdas em condutores e dielétricos

Em termos de expressão matemática, a eficiência total pode ser definida da seguinte forma:

$$\eta_0 = \eta_r \eta_c \eta_d \quad (17)$$

Onde:

η_0 – eficiência total (adimensional);

η_r – eficiência de reflexão (descasamento) = $(1 - |\Gamma|^2)$ (adimensional);

η_c – eficiência condutiva (adimensional);

η_d – eficiência dielétrica (adimensional);

Γ – coeficiente de reflexão de tensão na entrada dos terminais da antena.

O coeficiente de reflexão Γ , pode ser expresso como:

$$\Gamma = \frac{Z_{in} - Z_0}{Z_{in} + Z_0} \quad (18)$$

Sabendo que Z_{in} corresponde a impedância de entrada da antena e Z_0 a impedância característica da linha de transmissão.

Na prática, os valores de η_c e η_d são difíceis de calcular, porém podem ser determinados experimentalmente. Contudo é mais conveniente escrever a equação (17) da seguinte forma:

$$\eta_0 = \eta_r \eta_{cd} = \eta_{cd} (1 - |\Gamma|^2) \quad (19)$$

Onde η_{cd} é a eficiência de radiação da antena usada para relacionar o ganho com sua diretividade.

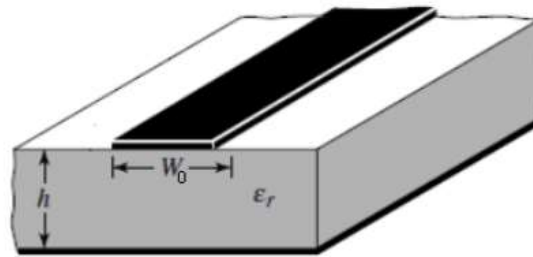
2.4. MÉTODOS DE ALIMENTAÇÃO

Métodos de alimentação é um importante assunto a ser estudado pois a maneira como é alimentado a antena, influencia diretamente na impedância de entrada e conseqüentemente em outros parâmetros da antena. A seguir serão descritos alguns métodos de alimentação, são eles: Linha de Microfita, Cabo Coaxial, Acoplamentos por Abertura e Acoplamentos por Proximidade.

2.4.1. Linha de Microfita

A linha de alimentação de microfita possui características como fácil modelagem, casamento de impedância simples e facilidade de fabricação podendo ser controlado o ponto de inserção. Esse tipo de alimentação consiste numa fita condutora, onde geralmente, tem largura muito menor que a da plaqueta (BALANIS, 2005), a figura 7 mostra um exemplo desse tipo de alimentação.

Figura 7: Alimentação com Linha de Microfita



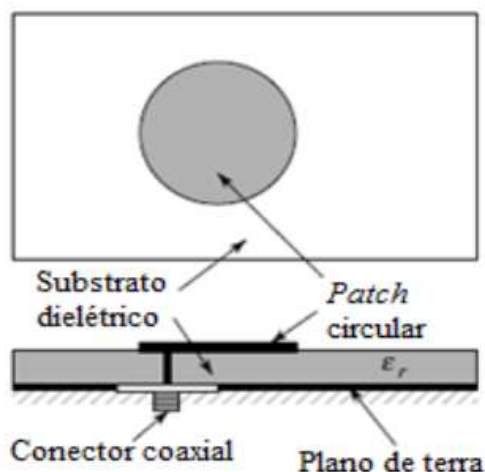
Fonte: Adaptado de Balanis (2005)

Nesse tipo de alimentação, obtém-se melhor casamento de impedância, tendo em vista a possibilidade de ajustar a impedância de entrada modificando as dimensões do alimentador (MEDEIROS, 2013). Quando este método de alimentação é utilizado em antenas que possuem substratos com espessuras maiores acontece um aumento da largura de banda bem como a presença de radiações indesejáveis.

2.4.2. Cabo Coaxial

No método do cabo coaxial, a parte interna do cabo atravessa o substrato e é conectado a plaqueta radiadora (*patch*), enquanto que o conector externo é interligado ao plano de terra, como observado na figura 8:

Figura 8: Alimentação por Cabo Coaxial



Fonte: Adaptado de Balanis (2005)

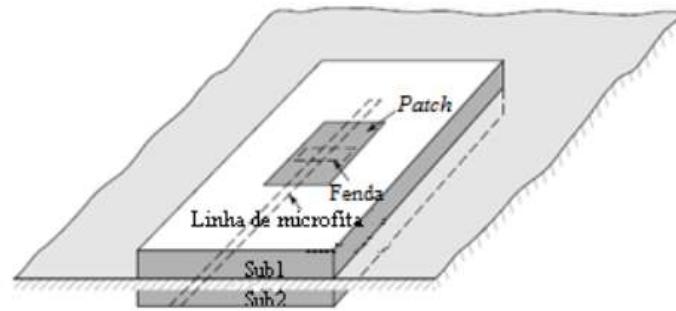
Esse tipo de alimentação possui vantagens como a simplicidade de projeto em virtude do posicionamento do ponto de alimentação para ajuste do nível da impedância de entrada, contudo, uma desvantagem desse método é a estreita largura de banda, onde para a construção de arranjos, necessita grandes quantidades de conexões de solda, tornando a produção difícil comprometendo o desempenho (MEDEIROS, 2013).

2.4.3. Acoplamentos por Abertura

Este método de alimentação consiste em dois substratos separados por um plano de terra. Na parte inferior do substrato de baixo (Sub2) existe uma linha de microfita, onde a energia é acoplada ao *patch* através de uma fenda no plano de terra que separa os dois substratos (BALANIS, 2005). A figura 9 mostra o método de alimentação por acoplamento de abertura.

Esta técnica apresenta vantagens como fácil casamento de impedância e radiações de espúria minimizadas, como desvantagens apresenta baixos valores de largura de banda e difícil fabricação.

Figura 9: Alimentação via acoplamento por abertura

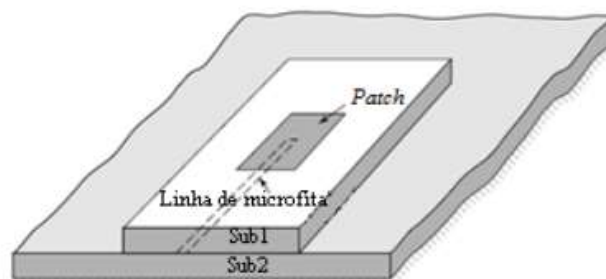


Fonte: Adaptado de Balanis (2005)

2.4.4. Acoplamentos por Proximidade

O método de acoplamento por proximidade é bastante semelhante ao acoplamento por abertura, a diferença principal na estrutura é pelo fato de não possuir uma fenda no plano de terra (MEDEIROS, 2013). A figura 10 mostra a configuração desse tipo de alimentação.

Figura 10: Alimentação via acoplamento por proximidade



Fonte: Adaptado de Balanis (2005)

Este tipo de alimentação consiste em dois substratos na qual, entre eles existe uma linha de microfita, no substrato superior (Sub1) é acoplado o elemento radiador (*patch*) e no substrato inferior (Sub2) é inserido o plano de terra (MAIA, 2016). Entre os métodos apresentados até agora, o acoplamento por proximidade é o que apresenta maior

largura de banda e uma modelagem relativamente simples, no entanto, sua fabricação é um pouco mais difícil (BALANIS, 2005).

2.5.MÉTODOS DE ANÁLISE

Existem diversos métodos para análise de antenas de microfita, a complexidade geométrica da antena é que mostra qual o melhor método a ser utilizado como modelo matemático de análise, com isso, antenas que possuem uma geometria bem mais complexa exige uma modelagem matemática mais precisa e complicada onde reduza ao máximo os erros de aproximação (GUERRA, 2016).

Basicamente, os métodos de análise de microfita são classificados em duas categorias: Modelos Aproximados e Modelos de Onda Completa. O primeiro modelo (aproximado) toma como base a distribuição de corrente magnética equivalente nas margens do elemento radiador (*patch*). Este tipo de modelo apresenta uma precisão relativamente satisfatória em determinados valores de frequência, tendo em vista que o aumento da frequência torna a análise com baixa precisão. Os principais modelos dessa categoria são: Modelo de Linha de Transmissão (*TLM – Transmission Line Method*) e o Modelo da Cavidade (FILHO, 2010). O outro tipo de categoria, onda completa, se baseia pela distribuição de corrente elétrica no *patch*, possui uma formulação matemática mais rigorosa na qual fornece resultados mais precisos e a possibilidade de resolver prover problemas em altas frequências. Os métodos numéricos utilizados nessa segunda categoria geralmente são: Métodos dos Momentos (*MoM – Method of Moments*), Método dos Elementos Finitos (*FEM – Finite Element Method*), Diferenças Finitas no Domínio do Tempo (*FDTD – Finite Difference Time Domain*) (HOLANDA, 2016). Contudo, estes tipos de modelos necessitam um esforço computacional maior. A seguir serão apresentados alguns métodos de análise.

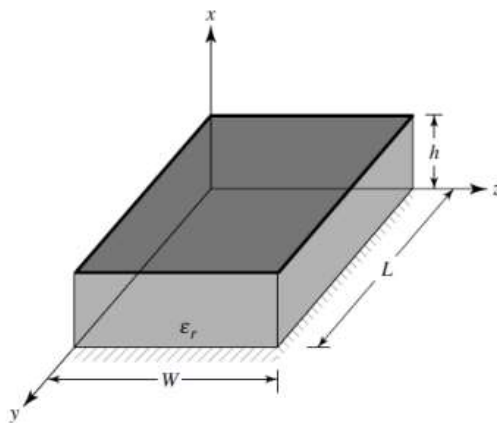
O *Software* utilizado neste trabalho foi o *Ansoft HFSS (HFSS – High Frequency Structure Simulator)*. O intuito da utilização desse software é a comparação, por meio de simulações, das antenas de microfita produzidas com as projetadas e verificar se os valores dos parâmetros das antenas são semelhantes. Este *Software* determina os parâmetros espalhamento (S) e a distribuição dos campos eletromagnéticos no interior de uma estrutura na qual utiliza o Método dos Elementos Finitos (FEM) como modelo matemático para realização dos cálculos. Este modelo matemático consiste em dividir a

região em análise em sub-regiões denominadas de elementos finitos, onde o conjunto deles formam uma malha (*mesh*). Os valores são calculados por meio de interpolação (CARNEIRO, 2010).

2.5.1. Modelo da Cavidade

O modelo da cavidade, basicamente, trata a antena de microfita como uma cavidade ressonante onde as faces superiores e inferiores são paredes elétricas e as laterais são paredes magnéticas (OLIVEIRA, 2011). Nesse modelo, as paredes laterais são consideradas condutores magnéticos perfeitos. A figura 11 mostra a geometria do modelo de análise.

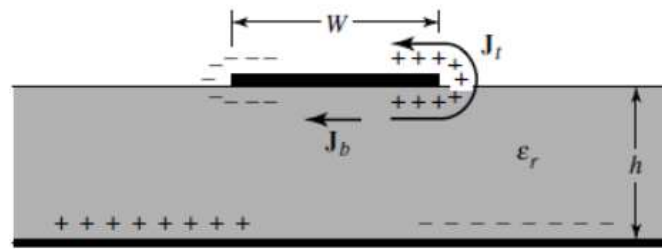
Figura 11: Modelo da Cavidade Ressonante



Fonte: Adaptado de Balanis (2005)

Quando o *patch* é energizado, uma distribuição de correntes surge nas superfícies superior (\mathbf{J}_t) e inferior (\mathbf{J}_b) da plaqueta, conforme mostrado na figura 12.

Figura 12: Distribuição de carga e densidade de corrente num *patch*.



Fonte: Balanis (2005)

Essa distribuição de cargas é controlada por mecanismos de atração e repulsão, onde o atrativo ocorre através entre cargas de sinais opostos existentes na parte inferior do *patch* e o plano de terra, e o repulsivo ocorre entre cargas de mesmo sinal na parte inferior da plaqueta onde existe a tendência em empurrar algumas cargas da plaqueta para as bordas e para face superior do *patch*. Em virtude da maioria das antenas de microfita possuírem a razão entre espessura e largura ser muito pequena, variações de campo ao longo da espessura do substrato são consideradas constantes, considerando os condutores da antena como perfeitos. Dessa maneira, será considerado apenas os modos de operação TM^x . (BALANIS, 2005).

Com base na figura 11 e em conceitos de potencial vetorial, a equação 20 descreve o vetor potencial A_x , equação da onda homogênea.

$$\nabla^2 A_x + k^2 A_x = 0 \quad (20)$$

A solução da equação 20 é através da técnica de separação de variáveis, logo:

$$A_x = [A_1 \cos(k_x x) + B_1 \sin(k_x x)] [A_2 \cos(k_y y) + B_2 \sin(k_y y)] [A_3 \cos(k_z z) + B_3 \sin(k_z z)] \quad (21)$$

Onde k_x , k_y , k_z , são os números de onda ao longo das direções x , y e z , respectivamente onde são determinados de modo a satisfazer as condições de contorno.

Os campos elétricos e magnéticos no interior da cavidade são determinados através das equações (22) a (24).

$$E_x = -j \frac{1}{\omega \mu \varepsilon} \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + k^2 \right) A_x \quad H_x = 0 \quad (22)$$

$$E_y = -j \frac{1}{\omega \mu \varepsilon} \frac{\partial^2 A_x}{\partial x \partial y} \quad H_y = \frac{1}{\mu} \frac{\partial A_x}{\partial z} \quad (23)$$

$$E_z = -j \frac{1}{\omega \mu \varepsilon} \frac{\partial^2 A_x}{\partial x \partial z} \quad H_z = -\frac{1}{\mu} \frac{\partial A_x}{\partial y} \quad (24)$$

Com as seguintes condições de contorno:

$$E_y(x'=0, 0 \leq y' \leq L, 0 \leq z' \leq W) = E_y(x'=h, 0 \leq y' \leq L, 0 \leq z' \leq W) = 0 \quad (25)$$

$$H_y(0 \leq x' \leq h, 0 \leq y' \leq L, z'=0) = H_y(0 \leq x' \leq h, 0 \leq y' \leq L, z'=W) = 0 \quad (26)$$

$$H_z(0 \leq x' \leq h, y'=0, 0 \leq z' \leq W) = H_z(0 \leq x' \leq h, y'=L, 0 \leq z' \leq W) = 0 \quad (27)$$

As coordenadas indicadas pelas letras x' , y' e z' representam as coordenadas no interior da cavidade. Aplicando-se as condições de contorno, pode-se obter que $B_1=B_2=B_3=0$ juntamente com as equações (28), (29) e (30).

$$k_x = \frac{m\pi}{h}, \quad m=0,1,2,3... \quad (28)$$

$$k_y = \frac{n\pi}{L}, \quad n=0,1,2,3... \quad (29)$$

$$k_z = \frac{p\pi}{W}, \quad p=0,1,2,3... \quad (30)$$

Logo, a forma final para o potencial vetorial A_x no interior da cavidade é:

$$A_x = A_{mnp} \cos(k_x x') \cos(k_y y') \cos(k_z z') \quad (31)$$

Onde A_{mnp} representa os coeficientes de amplitude de cada modo mnp , k_x , k_y e k_z representa os números de onda e m , n e p os modos de propagação ao longo da direção x , y e z (BALANIS, 2005).

As frequências de ressonância da cavidade são dadas por:

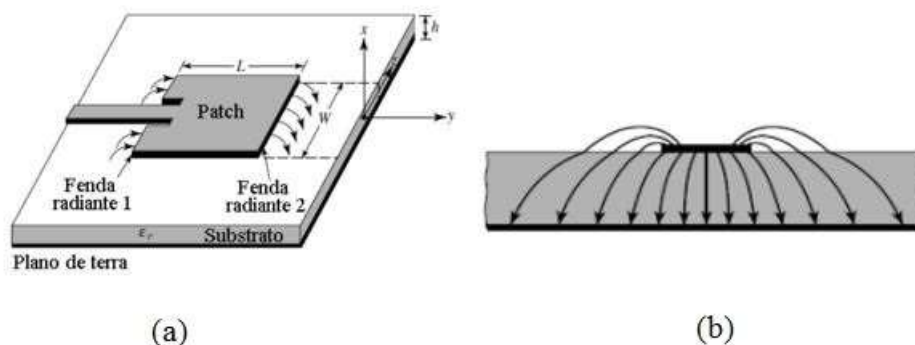
$$(f_r)_{mnp} = \frac{1}{2\pi\sqrt{\mu\epsilon}} \sqrt{\left(\frac{m\pi}{h}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{L}\right)^2 + \left(\frac{p\pi}{W}\right)^2} \quad (32)$$

O modo de frequência dominante é representado pelo modo em que a frequência de ressonância é a mais baixa.

2.5.2. Modelo da Linha de Transmissão

O método da linha de transmissão possui a modelagem mais simples que o método da cavidade, na qual proporciona uma boa percepção física, contudo com uma precisão menor. Este tipo de modelo considera os efeitos de franjamento no *patch* da antena de microfita devido possuírem dimensões finitas em largura e comprimento (BALANIS, 2005). Conforme mostra a figura 13.

Figura 13: Efeito de frajamento numa antena de microfita (a) Vista isométrica e (b) Vista frontal



Fonte: Adaptado de Balanis (2005)

Pela figura 13, pode-se observar o efeito de franjamento na antena de microfita onde mostra as linhas de campo tanto no ar como no substrato da antena. Neste caso, esse efeito de franjamento dos campos pelas bordas, faz com que a linha de microfita pareça eletricamente maior do que suas dimensões reais. Tendo em vista que esse efeito ocorre, existe a necessidade de uma modelagem de uma permissividade efetiva (ϵ_{ref}) que leva em consideração a permissividade do ar e do substrato (ϵ_r), de modo que a linha de transmissão da antena possua a mesmas características elétricas de uma antena ideal que não sofre esse efeito. (BALANIS, 2005). A constante dielétrica efetiva é dada por:

$$\epsilon_{\text{ref}} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[1 + 12 \frac{h}{W} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (33)$$

Onde h representa a espessura do substrato, e W a largura do *patch* e ϵ_r é a permissividade elétrica relativa do substrato mostrados na figura 13(a).

O efeito de franjamento também interfere no comprimento da antena. Em virtude desse efeito, a antena de microfita parece eletricamente maior que suas dimensões físicas, onde as dimensões do *patch* ao longo do seu comprimento são estendidas num comprimento de $2\Delta L$, onde ΔL é um valor em função da constante dielétrica efetiva (ϵ_{ref}) e da razão entre largura e espessura (W/h). Segundo Hammerstad (1975), essa relação de ΔL , extensão normalizada do comprimento, com a constante dielétrica efetiva, pode ser calculada através da equação (34).

$$\frac{\Delta L}{h} = 0,412 \frac{(\epsilon_{\text{ref}} + 0,3) \left(\frac{W}{h} + 0,264 \right)}{(\epsilon_{\text{ref}} + 0,258) \left(\frac{W}{h} + 0,8 \right)} \quad (34)$$

Logo, o comprimento efetivo do *patch* da antena de microfita é dado por:

$$L_{\text{eff}} = L + 2\Delta L \quad (35)$$

Com os valores da frequência de ressonância (f_r), espessura do substrato (h) e constante dielétrica do substrato (ϵ_r), é possível calcular os demais parâmetros de projeto de antenas de microfita com *patch* retangular através das equações (36) e (37).

$$W = \frac{1}{2f_r \sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad (36)$$

$$L = \frac{1}{2f_r \sqrt{\epsilon_{\text{ref}} \sqrt{\mu_0 \epsilon_0}}} - 2\Delta L \quad (37)$$

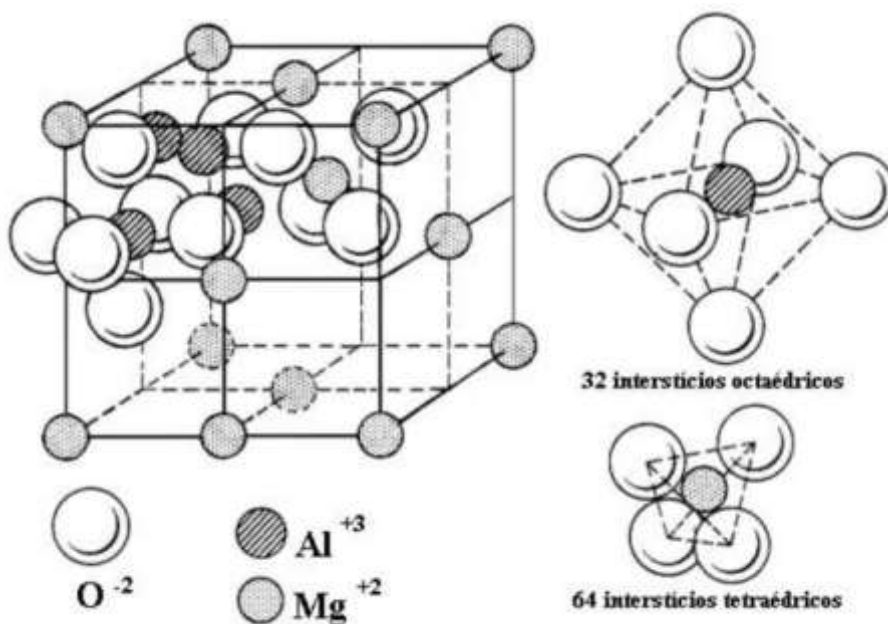
Onde ϵ_0 é a permissividade elétrica no vácuo e μ_0 a permeabilidade magnética no vácuo.

3. ESTRUTURA ESPINÉLIO – FERRITAS

Estruturas espinélio são óxidos ternário do tipo AB_2O_4 , onde “A” representa um cátion metálico divalente (Mg, Fe, Zn, Mn, Ni, Co, V e Cu) que normalmente ocupa o sítio tetraédrico e “B” representa um cátion metálico trivalente (Al, Fe e Cr) que geralmente ocupa o sítio octaédrico de um cristal cúbico (HECK et al., 2005). Geralmente, essas estruturas são sintetizadas através de reações no estado sólido, contudo esses métodos convencionais impossibilitam a produção de estruturas com a estequiometria e homogeneidade morfológica e estrutural controlada.

A figura 14, mostra um exemplo de estrutura espinélio de $MgAl_2O_4$.

Figura 14: Célula unitária de uma estrutura espinélio do tipo AB_2O_4



Fonte: Lima (2007)

Através da figura 14 pode-se observar os átomos dos cátions bivalentes (Mg) posicionados na região tetraédrica e os cátions trivalentes (Al) na região octaédrica, onde estão representação pelo sítio “A”, tetraedral, e o sítio “B”, octaedral.

Ferritas do tipo espinélio são óxidos cerâmicos ferrimagnéticos com estrutura cristalina similar ao mineral $MgAl_2O_4$. Os óxidos cerâmicos com estrutura de espinélio,

como as ferritas, possuem características como: alta estabilidade termodinâmica, baixa condutividade elétrica e resistência a corrosão (ASSIS, 2013).

As ferritas são materiais cerâmicos com resistividade muito alta, permissividade elétrica relativa escalar na faixa de 10 e 15 e permeabilidade magnética tensorial. Pelo tensor de Polder é possível descrever as propriedades magnéticas do material de acordo com a orientação do campo magnético de polarização aplicada. Um campo magnetostático aplicado nas direções x, y e z, o tensor permeabilidade magnética é dado respectivamente por (VASCONCELOS, 2010):

$$\bar{\mu}=\mu_0 \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \mu_r & -jk_r \\ 0 & jk_r & \mu_r \end{vmatrix}; \quad (38)$$

$$\bar{\mu}=\mu_0 \begin{vmatrix} \mu_r & 0 & -jk_r \\ 0 & 1 & 0 \\ jk_r & 0 & \mu_r \end{vmatrix}; \quad (39)$$

$$\bar{\mu}=\mu_0 \begin{vmatrix} \mu_r & -jk_r & 0 \\ jk_r & \mu_r & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}; \quad (40)$$

Nas três direções, os termos μ_r e k_r nas equações (38), (39) e (40), podem ser escritos como:

$$\mu_r = 1 - \frac{\gamma^2 H_0 4\pi M_s}{f^2 - (\gamma H_0)^2} \quad (41)$$

$$k_r = \frac{\gamma 4\pi M_s}{f^2 - (\gamma H_0)^2} \quad (42)$$

Onde γ é a razão giromagnética da ferrita, em MHz/Oe, $4\pi M_s$ é a magnetização de saturação do material, em Gauss, H_0 é a intensidade do campo magnetostático aplicado, em Oester, e f é a frequência de operação em GHz.

Existem diversos estudos na aplicação das ferritas como substratos em antenas de microfita, um desses exemplo é a utilização de substratos ferrimagnéticos em rampa

como proposta para melhorar a largura de banda de antenas planares, onde a ideia consiste em considerar o efeito das variações na altura do substrato em rampa que apoia o patch metálico (ALBUQUERQUE et al., 2004). Outros estudos como a aplicação de substrato em anel de ferrita na tentativa de aumentar o ganho das antenas sem comprometer a largura de banda da mesma (RIVERA-ALBINO; BALANIS, 2013) vem sendo estudado.

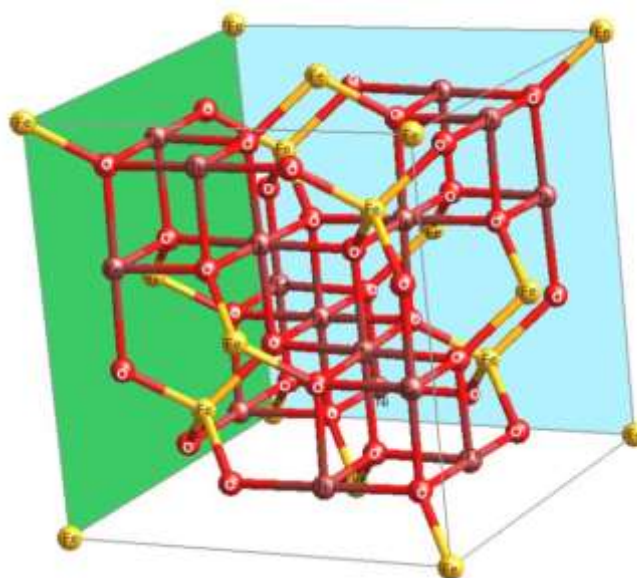
A seguir, será apresentado as ferritas utilizadas neste trabalho.

3.2.FERRITA DE NÍQUEL (NiFe_2O_4)

Pós de ferrita de níquel nanométricos é um material bastante utilizado devido seu alto desempenho eletromagnético, possuindo excelente estabilidade química e dureza mecânica, coercividade e magnetização de saturação moderada. Estas propriedades torna as ferritas de níquel um bom material para aplicação em materiais de baixa perda em altas frequências. As propriedades do NiFe_2O_4 sintetizadas são influenciadas por alguns fatores como: composição, pureza e microestrutura. Esses fatores são sensíveis aos métodos de preparação utilizado na síntese. Alguns métodos utilizados para síntese desse tipo de ferrita são: co-precipitação, métodos hidrotérmicos, Sol-Gel (utilizado para síntese de todas as ferritas deste trabalho), etc (KOOTI; SEDEH, 2013), incluindo também o método de descarga de arco de plasma (*Plasma Arc Discharge – PAD*) (SAFARI; GHEISARI; FARBOD, 2016)

A figura 15 ilustra a estrutura da ferrita de níquel.

Figura 15: Estrutura Cristalina do NiFe₂O₄.



Fonte: Carvalho (2012)

Preferencialmente, metade dos íons de ferro preenchem a região tetraédrica (Sítio A), enquanto a outra metade ocupa a região octaédrica (Sítio B), logo o composto pode ser representado pela fórmula $(\text{Fe}^{3+})_A[\text{Ni}^{2+}\text{Fe}^{3+}]_B\text{O}_4^{2-}$, onde A e B representam os sítios tetraédricos e octaédricos respectivamente; Suas características magnéticas são baseadas na distribuição do íons nos sítios A e B, a propriedade ferromagnética deste material surge do momento magnético de rotação anti-paralela entre os íons Fe^{3+} no sítios tetraédricos e íons Ni^{2+} na região octaédrica (KARAKAŞ et al., 2015).

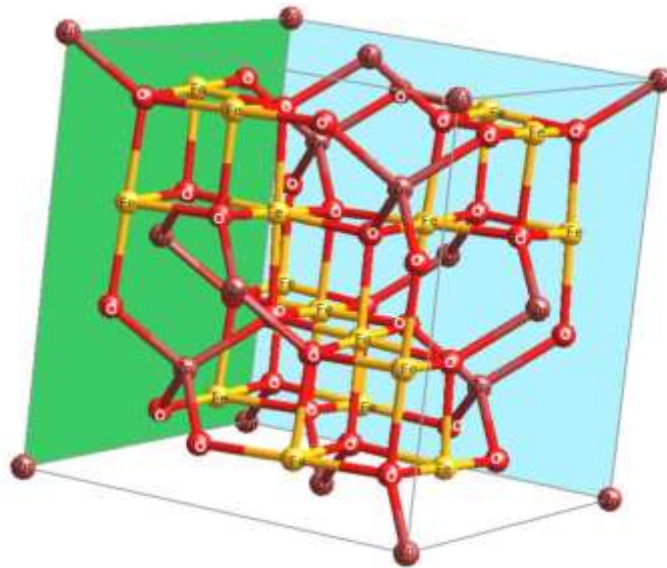
A ferrita de níquel (NiFe_2O_4) é um material essencial para a produção de componentes eletrônicos e magnéticos amplamente utilizados em aplicações tecnológicas avançadas. Dentre algumas aplicações notáveis estão os ferrofluidos magnéticos, sistema de armazenamento de informações e sistemas de alta frequência (KARAKAŞ et al., 2015).

3.3.FERRITA DE ZINCO (ZnFe_2O_4)

A síntese das ferritas de zinco conseguiu grandes progressos utilizando técnicas como hidrotermal, método Sol-Gel, co-precipitação e entre outros. O ZnFe_2O_4 , possui diversas aplicações tecnológicas, entre elas são: materiais magnéticos catalisadores, sensores de gás e matérias absorvedores (LIU et al., 2016).

A figura 16 ilustra a estrutura da ferrita de zinco.

Figura 16: Estrutura Cristalina do ZnFe_2O_4 .



Fonte: Carvalho (2012)

Como ilustra a figura 16, a estrutura cristalina da ferrita de zinco mostra as esferas da cor rosa representam os átomos de zinco localizados no sítio A, as esferas amarelas representam os átomos de ferro situados no sítio B e as esferas vermelhas representam os átomos de oxigênio.

A distribuição dos cátions nos sítios tetraédricos e octaédrico dependem do tamanho da partícula e do método utilizado na síntese. Estudos mostram que a distribuição dos cátions e o tamanho dos grãos afetam as propriedades magnéticas e elétricas das ferritas. Em temperatura ambiente, o ZnFe_2O_4 apresenta comportamento paramagnético e comportamento antiferromagnético abaixo da temperatura Néel de 10 K (SHANMUGAVANI et al., 2014).

3.4.FERRITA Ni-Zn

As ferritas do tipo Ni-Zn são consideradas as mais versáteis devido sua gama de aplicação tecnológica em virtude de suas características como alta resistividade elétrica, alta permeabilidade (ALI et al., 2017) e baixa coercividade magnética. Essas ferritas podem ser obtidas por diversos métodos, alguns desses métodos são: Co-precipitação, rota de combustão automática, Sol-Gel, reação hidrotermal (JIANG et al., 2016).

Segundo Gabal, El-shishtawy e Angari (2012), os íons de níquel e zinco têm forte preferência pelas regiões tetraédricas e octaédricas, respectivamente, contudo em ferritas de Ni-Zn a variação na composição dos elementos envolventes, resulta numa redistribuição dos íons metálicos nos sítios A e B que podem modificar as propriedades da ferrita.

Através de (BRITO, 2006), pode-se encontrar valores de permeabilidade magnética em diversas estequiometrias utilizando como método de fabricação Cerâmico convencional. Na tabela 1, mostra alguns valores de ferritas do tipo $Ni_{0,5}Zn_{0,5}Fe_2O_4$ que são o foco deste trabalho.

Tabela 1: Permeabilidade Magnética (μ') de ferritas do tipo $Ni_{0,5}Zn_{0,5}Fe_2O_4$

Composição	Fabricação	Sinterização	μ'	Frequência
$Ni_{0,5}Zn_{0,5}Fe_2O_4$	Convencional	1200°C – 4h	304	1kHz
$Ni_{0,5}Zn_{0,5}Fe_2O_4$	Convencional	1100°C – 6h	138*	1MHz

Fonte: Adaptado de Brito (2006)

Já na tabela 3, pode-se observar alguns valores de ϵ' para ferritas do tipo $Ni_{0,5}Zn_{0,5}Fe_2O_4$

Tabela 2: Constante dielétrica (ϵ') de ferritas do tipo $\text{Ni}_{0,5}\text{Zn}_{0,5}\text{Fe}_2\text{O}_4$

Composição	Fabricação	Sinterização	ϵ'	Frequência
$\text{Ni}_{0,5}\text{Zn}_{0,5}\text{Fe}_2\text{O}_4$	Convencional	1200°C – 6h	44,22	100kHz
$\text{Ni}_{0,5}\text{Zn}_{0,5}\text{Fe}_2\text{O}_4$	Precursor de citrato	1200°C – 1h	100	30Hz
$\text{Ni}_{0,5}\text{Zn}_{0,5}\text{Fe}_2\text{O}_4$	Síntese por combustão	1250°C – 3h	81*	1MHz

Fonte: Adaptado de Brito (2006)

Esses valores variam muito dependendo do método de fabricação ou da frequência em análise. Os resultados de permeabilidade magnética e constante dielétrica para ferritas do tipo $\text{Ni}_{0,5}\text{Zn}_{0,5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ mostrados na tabela 1 e 2, tiveram o objetivo de mostrar esse fato.

4. TÉCNICAS DE CARACTERIZAÇÃO

Neste capítulo serão apresentadas algumas técnicas de caracterização estrutural, elétrica e magnética utilizadas neste trabalho.

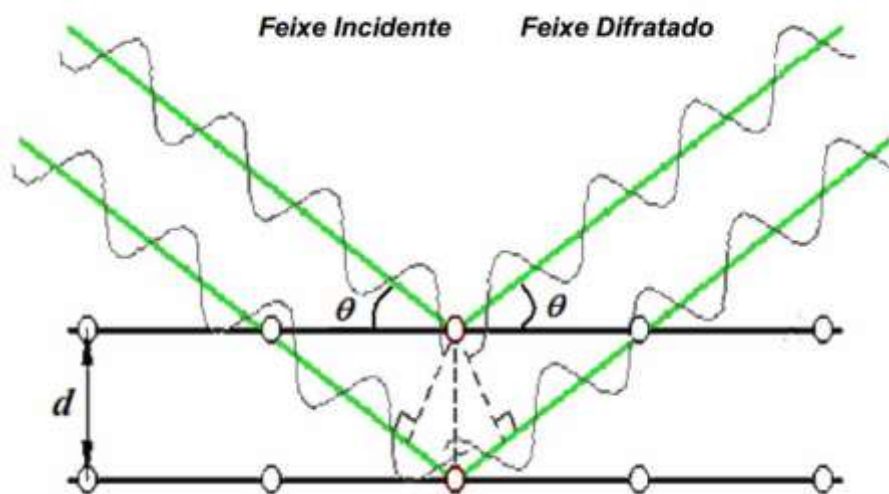
4.2. DIFRAÇÃO DE RAIOS X (DRX)

O procedimento de análise de difração de raios X de pó é um método eficiente para determinar a estrutura cristalina de uma amostra e é muito utilizada nas pesquisas científicas. Os primeiros estudos referentes a essa técnica foram realizados em 1895 com o físico alemão Wilhelm Conrad Roentgen onde ele detectou pela primeira vez a existência de raios X (OLIVEIRA, 2011).

Em 1912, Max Von Laue realizou a primeira experiência com difração de raio X. Essa experiência deu base para que Bragg criasse a cristalografia por raios X, no qual ele explicou o fenômeno de difração através de metais cristalinos, possuíam determinados comprimentos de onda e direções incidentes definidos, picos intensos de radiação espalhada (PINHEIRO, 2015).

Essa técnica consiste em incidir radiação numa amostra e na detecção de fótons espalhados que pertencem ao feixe difratado. Quando a amostra recebe os feixes, a radiação choca-se com os planos cristalinos que estão espaçados a uma distância d entre si, na qual forma um ângulo θ do feixe incidente com o plano (FILHO, 2010), conforme mostra a figura 17.

Figura 17: Feixes de raios X incidente e difratado



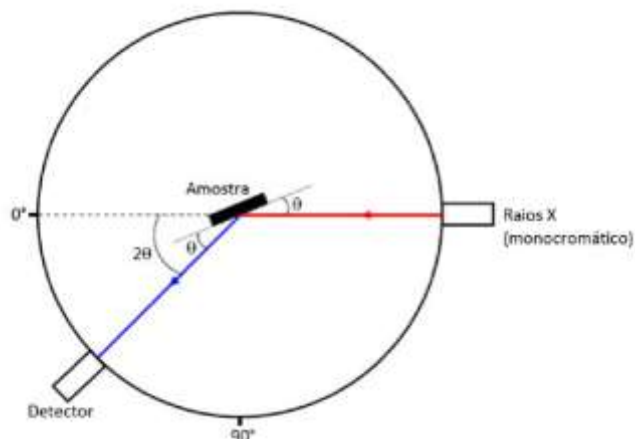
Fonte: Filho (2010)

Este fenômeno pode ser descrito pela Lei de Bragg, equação (43) na qual possui a relação da posição dos feixes difratados em termos de comprimento de onda λ do raio X incidente juntamente com a distância entre os planos cristalográficos (CALLISTER, 2008).

$$n\lambda = 2d \sin \theta \quad (43)$$

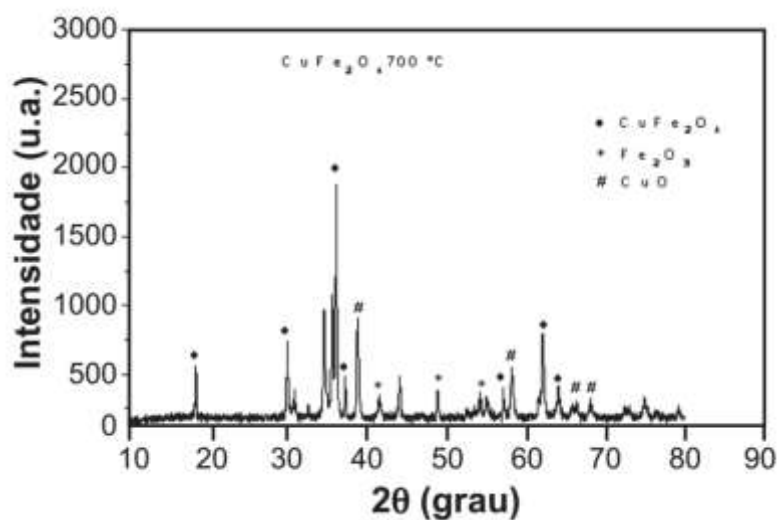
O instrumento utilizado para análise da estrutura cristalográfica de materiais é chamado de difratômetro. Para realizar a medida, a amostra é inserida no difratômetro onde o elemento que se deseja fazer a análise é girado de um ângulo θ e o detector dos feixes refletidos é girado de um ângulo 2θ , definido como ângulo de Bragg θ_B ($\theta_B = 2\theta$) e λ é um valor constante. A figura 18 mostra o esquema descrito.

Figura 18: Sistema do Difratorômetro



Fonte: Amorim (2015)

Depois de realizado toda a medida de raios X da amostra, o computador conectado ao difratômetro mostra o difratograma em função do ângulo de Bragg da amostra. Observado a Lei de Bragg na realização do experimento, obtém-se picos relativos aos planos cristalinos da amostra. Todo material tem um difratograma característico que identifica o material (JÚNIOR, 2012). A figura 19, mostra um exemplo de difratograma.

Figura 19: Exemplo de difratograma de raios X de CuFe_2O_4 .

Fonte: COSTA et al. (2011)

A figura 19 mostra o espectro característico da CuFe_2O_4 com seus respectivos picos de intensidade.

Todas as análises qualitativas (refinamento) dos picos obtidas nos experimentos foram pelo método *Rietveld*, através do programa *MAUD* com o banco de dados do *Crystallography Open Database – (COD)*.

4.3.MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)

A microscopia eletrônica de varredura (MEV) é uma técnica utilizada para a obtenção de imagens estruturais de uma amostra. Com essa técnica é possível observar a porosidade, tamanho dos grãos, morfologia entre outras características (DEDAVID et al., 2007).

O princípio de funcionamento do MEV consiste em utilizar feixes de elétrons de alta energia em torno de toda amostra onde ocorrerá a interação, onde parte do feixe é refletido e coletado por um sensor onde o mesmo converte este sinal em imagem para ser visualizado na tela do computador (OLIVEIRA, 2011).

Em virtude da utilização de elétrons em alta velocidade devido as altas voltagens neste procedimento, os elétrons possuem comprimentos de ondas que podem ser na ordem de 3pm, acarretando a possibilidade de grandes ampliações e grande capacidade de boas resoluções da amostra analisada no MEV. O feixe de elétrons é focado e a imagem é formada através de lentes magnéticas (CALLISTER, 2008). A figura 20 mostra um tipo de MEV.

Figura 20: Microscópio Eletrônico de Varredura - MEV



Fonte: Autoria Própria

4.4. MEDIDAS ELÉTRICAS E MAGNÉTICAS

Um dos parâmetros importantes para o desenvolvimento de antenas de microfita são os valores da permissividade elétrica e permeabilidade magnética. Neste tópico será apresentado como são medidos esses parâmetros de um material.

- Medidas Elétricas

A permissividade elétrica de um material pode ser medida através de um equipamento chamado Analisador de Redes Vetoriais (ARV), popularmente conhecido como VNA (*Vector Network Analyzer*) utilizando o método da sonda coaxial (AGILENT TECHNOLOGIES, 2013).

Com a equação 44, pode-se obter o valor da permissividade elétrica.

$$\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r = \epsilon_0 (\epsilon_r' - j\epsilon_r'') \quad (44)$$

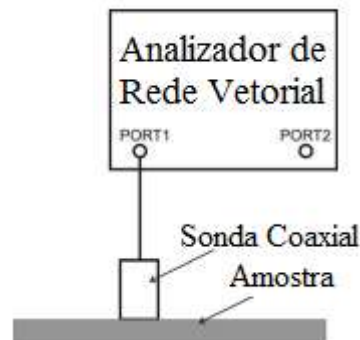
Onde ϵ_0 é a permissividade no vácuo ($8,854 \times 10^{-12}$ F/m), ϵ_r é a permissividade relativa, ϵ_r' é a constante dielétrica, parte real da permissividade relativa, ϵ_r'' corresponde ao fator de perda.

Com os valores da parte real e imaginária da permissividade relativa do material, pode-se obter a tangente de perdas dada pela equação 45.

$$\operatorname{tg}\delta = \frac{\epsilon''_r}{\epsilon'_r} \quad (45)$$

O Método de medição da permissividade elétrica através de sonda coaxial consiste no posicionamento da amostra sob a sonda coaxial que por sua vez utiliza os parâmetros S_{11} para estimar o valor da permissividade. A sonda é conectada a um cabo que é interligada com o Analisador de Rede Vetorial (LESNIKOWSKI, 2012), como mostra a figura 21.

Figura 21: Analisador de Rede Vetorial (Sonda Coaxial)



Fonte: Adaptado de LESNIKOWSKI (2012).

- Medidas Magnéticas

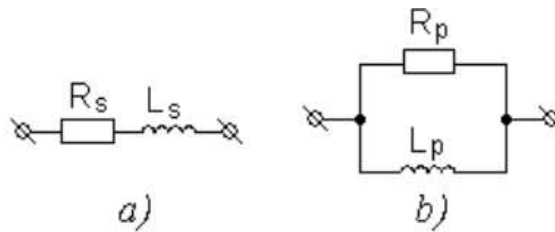
Uma das principais características que definam uma ferrita, que é objeto deste trabalho, é a sua permeabilidade magnética comumente representada por um número complexo (CUELLAR et al., 2012), conforme a equação 46.

$$\mu(f) = \mu' - j\mu'' \quad (46)$$

Onde a parte real μ' representa a energia armazenada da ferrita dependendo da frequência e μ'' significa as perdas.

O método consiste em determinar a permeabilidade magnética de um material ferromagnético através de medições de resistência e reatância de uma bobina de indutância com núcleo toroidal do material que se deseja medir. Contudo, deve ser levado em consideração algumas imperfeições da indutância através de circuitos equivalentes (DMITRO; SERHIY; IVANNA, 2014), a figura 22 mostra esses circuitos.

Figura 22: Circuitos de indutância equivalente a) Sequencial e b) Paralelo



Fonte: Dmitro, Serhiy e Ivanna (2014)

A parte sequencial representa as perdas na bobina e as perdas no núcleo sendo representadas pela parte em paralelo.

Para caracterizar a impedância do indutor, utiliza-se um Analisador de impedância onde obtém os valores da impedância em função da frequência, conforme a equação 47.

$$Z(f) = R(f) + jX(f) \quad (47)$$

Em seguida utiliza-se as equações 48 e 49 para relacionar a impedância medida com as propriedades magnéticas do material.

$$\mu'(f) = \frac{2\pi X(f)}{\omega N^2 \mu_0 H_E \ln\left(\frac{D_e}{D_i}\right)} \quad (48)$$

$$\mu''(f) = \frac{2\pi R(f)}{\omega N^2 \mu_0 H_E \ln\left(\frac{D_e}{D_i}\right)} \quad (49)$$

μ_0 é a permeabilidade no vácuo, ω é a frequência angular, H_E altura, D_e é o diâmetro externo, D_i é o diâmetro interno e N é o número de espiras.

A relação mostrada na equação 50, representa a tangente de perdas magnéticas.

$$\operatorname{tg}\delta = \frac{\mu''(f)}{\mu'(f)} \quad (50)$$

5. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste tópico será mostrado a metodologia utilizada na elaboração deste trabalho, desde a etapa de produção do pó das ferritas até a etapa de produção das antenas e as devidas medições. A figura 22 mostra de forma resumida a metodologia no desenvolvimento deste trabalho.

Figura 22: Fluxograma dos processos utilizados



Este trabalho consiste na produção de três tipos de pós de ferritas: Ferrita de Níquel (NiFe_2O_4), Ferrita de Zinco (ZnFe_2O_4) e Ferrita Níquel-Zinco ($\text{Ni}_{0,5}\text{Zn}_{0,5}\text{Fe}_2\text{O}_4$), para a fabricação de diferentes antenas de microfita utilizando como substrato, pastilhas das ferritas mencionadas.

Como mostrado na figura 22, a primeira etapa para realização deste trabalho é a produção dos pós de ferritas para depois fazer a caracterização, que confirma a produção das ferritas, e fabricação das pastilhas que serão usadas como substratos das antenas.

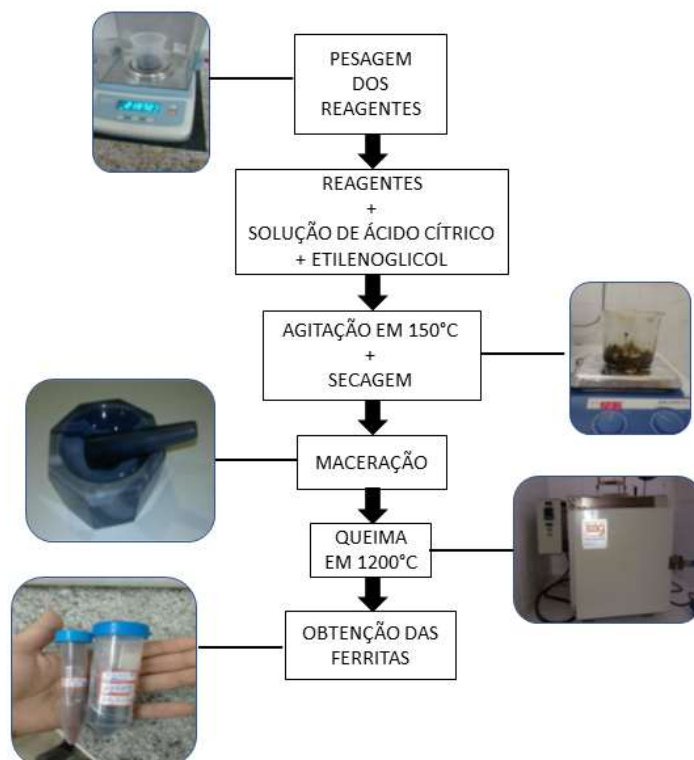
Com as pastilhas de ferritas produzidas é feito as medições de permissividade elétrica que serão necessárias na etapa seguinte de simulação e projeto. A etapa de simulações é utilizada para observar o comportamento da antena projetada utilizando o *software Ansys HFSS®*. As permeabilidades foram obtidas da literatura científica.

Após a etapa de simulações e projeto as antenas de microfita, com substratos de ferritas, as antenas foram produzidas, e depois medidas na Universidade Federal do Rio Grande do Norte, UFRN com um Analisador de Redes Vetoriais, após isso foi realizado análise dos dados obtidos.

5.2. SÍNTESE DAS FERRITAS

A Figura 23 mostra as etapas para sintetização das ferritas utilizando a técnica SOL-GEL para este trabalho.

Figura 23: Fluxograma da síntese das ferritas



Fonte: Autoria Própria

Primeiramente é realizado a pesagem de todos os reagentes envolvidos na síntese de 30g para cada uma das ferritas propostas. A Tabela 3 mostra a quantidade de reagentes utilizadas após cálculos estequiométricos.

Tabela 3: Quantidade de reagentes necessário para produzir 30g de cada ferrita.

Experimento	Ferrita	Quantidade de Reagentes
1	NiFe_2O_4	Nitrato de Ferro (103,42 g) Nitrato de Níquel (37,22 g) Ácido Cítrico (121,03 g) Etilenoglicol (72,69 ml)
2	$\text{Ni}_{0,5}\text{Zn}_{0,5}\text{Fe}_2\text{O}_4$	Nitrato de Ferro (101,96 g) Nitrato de Níquel (18,35 g) Nitrato de Zinco (18,77g) Ácido Cítrico (119,32 g) Etilenoglicol (71,67 ml)
3	ZnFe_2O_4	Nitrato de Ferro (100,54 g) Nitrato de Zinco (37,02 g) Ácido Cítrico (117,66 g) Etilenoglicol (70,67ml)

Fonte: Aatoria Própria

Todos os cálculos estequiométricos estão apresentados no Anexo I deste trabalho para consulta.

A primeira etapa da síntese das ferritas consiste na pesagem dos reagentes envolvidos (Tabela 3) para cada tipo de ferrita e em seguida misturar com 350mL de água destilada, ácido cítrico e o etilenoglicol. A função do ácido cítrico é tornar o pH da solução baixo o suficiente para permitir a diluição dos nitratos na solução aquosa. O etilenoglicol tem o objetivo de agrupar as partículas para formar uma rede tridimensional, etapa chama de GEL.

Em seguida é realizado a agitação, com um agitador magnético, e a secagem da solução aquosa durante 24 horas numa temperatura de 150°C, como mostra a figura 24.

Figura 24: Secagem da solução aquosa no agitador magnético.



Fonte: Autoria Própria

O agitador magnético utilizado era da marca IKA[®], modelo C-Mag HS 7. Posteriormente a secagem da solução, foi feito a maceração (Figura 25) no produto resultante, para deixar o material mais homogêneo e assim realizar sua calcinação, representada pela etapa seguinte.

Figura 25: Maceração



Fonte: Autoria Própria

A calcinação do material foi feita em uma temperatura de 1200°C durante 2 horas numa taxa de aquecimento de 10°C/min, num forno tipo mufla conforme mostra a figura 26.

Figura 26: Forno tipo mufla.



Fonte: Autoria Própria

O forno utilizado foi da marca JUNG com capacidade de aquecimento até 1300°C. Esta etapa é responsável em eliminar qualquer vestígio de material orgânico presente na amostra. Com o material obtido (Figura 27) é realizado as etapas de caracterização para confirmar a formação das ferritas.

Figura 27: Amostras de Ferritas.



Fonte: Autoria Própria

Todo o processo de síntese das ferritas ocorreu no Laboratório de Análises Magnéticas e Ópticas (LAMOp) da Universidade do Estado do Rio Grande do Norte, UERN.

5.3. CARACTERIZAÇÃO

Posteriormente a sintetização das ferritas propostas nesse trabalho, dá-se início as caracterizações do material produzido com o intuito de obter informações relevantes que comprovem a efetiva síntese de ferrita como obtenção de parâmetros essenciais para os projetos das antenas de microfita.

5.3.1. Estrutura Cristalina

As amostras sintetizadas foram submetidas a difração de raio-X para verificação da formação da fase cristalina do material. O equipamento utilizado para o DRX das ferrita foi o difratômetro de raios-X modelo MiniFlex II da marca Rigaku, como mostra a figura 28.

Figura 28: Difratômetro de Raios X do LAMOp

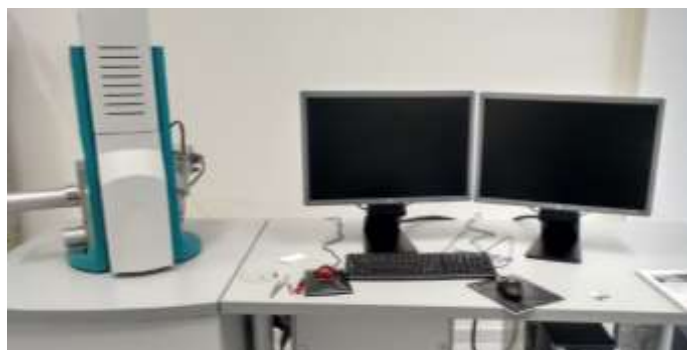


Fonte: Autoria Própria

O difratômetro utilizado variou o ângulo de 10° até 90° taxa de variação de $0,02^\circ/\text{s}$, com anodo de Cu, radiação α , tensão de 30kV e corrente de 15mA. O dados foram coletados para realizar uma análise microestrutural através do refinamento *Rietveld* utilizando o software *Maud (Material Analysis Using Diffraction)*. Para realizar o refinamento primeiramente é necessário obter as fichas cristalográficas das ferritas propostas. Essas fichas fornecem informações importantes como a posição dos átomos/íons na célula unitária, simetria, grupo espacial etc.

Posteriormente é realizado a Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) para obtenção de imagens tridimensionais da microestrutura das ferritas. A figura 29 mostra o MEV utilizado neste trabalho.

Figura 29: Microscópio Eletrônico de Varredura



Fonte: Autoria Própria

As amostras de ferritas são colocadas no microscópio e na tela do computador é mostrado a estrutura morfológica das amostras. O MEV utilizado foi da marca TESCA modelo VEGA3 que pertence ao mesmo laboratório da UERN, LAMOp.

5.3.2. Caracterização das Propriedades Elétricas

Os parâmetros elétricos das ferritas foram realizadas através de um Analisador de Redes Vetoriais utilizando o método de transmissão/reflexão com sonda coaxial da Rohde & Schwarz ZNB4 juntamente com um kit para medição de impedância da Aligent

85070E, como mostra a figura 30, localizado no Laboratório de Microondas da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, UFRN.

Figura 30: Analisador de Redes Vetoriais - Rohde & Schwarz ZNB4.



Fonte: Autoria Própria

Depois da calibração do aparelho, as amostras de ferritas são colocadas sob a sonda de medição do equipamento. Os dados são coletados pela sonda através do Analisador de Redes Vetoriais e enviados para um computador que possui um *software* específico do equipamento, retornando com os valores da permissividade elétrica do material, valores reais (ϵ') e imaginários (ϵ'').

5.4. FABRICAÇÃO DAS PASTILHAS, PROJETO E SIMULAÇÃO

As pastilhas de ferritas foram realizadas com o auxílio de uma prensa hidráulica localizada no Laboratório de Mecânica da UERN, como mostra a figura 31.

Figura 31: Prensa Hidráulica.



Fonte: Autoria Própria

Os procedimentos consistem em colocar o pó da ferrita numa matriz (pastilhador) de aço em formato cilíndrico (Figura 32) com um diâmetro de 20mm. Em seguida a matriz era posta sob a prensa e aplicava-se gradativamente um peso sobre o pastilhador. O peso era aumentado a cada 3 minutos num valor de 2 toneladas, com o objetivo de uma melhor compactação do pó até alcançar 10 toneladas, onde permanecia por mais 5 minutos para ser retirado.

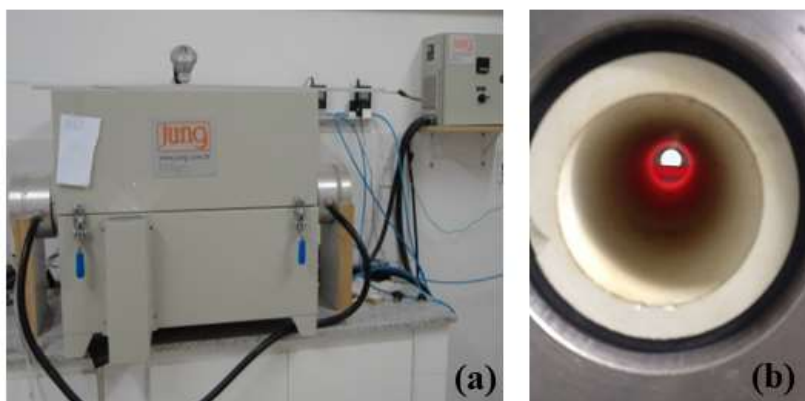
Figura 32: Pastilhador de 20mm de diâmetro.



Fonte: Autoria Própria

Esse procedimento se repetia para as três ferritas. Em seguida as pastilhas de ferritas eram levadas para a etapa de sinterização no LAMOp da UERN. Essa etapa consiste em tornar a pastilha prensada que é muito frágil para uma pastilha firme e resistente no manuseio viabilizando a fabricação da antena de microfita. A figura 33 mostra a etapa de sinterização.

Figura 33: Forno Tubular (a) Vista externa, (b) Vista interna



Fonte: Autoria Própria

O forno utilizado na etapa de sinterização era um forno tipo tubular da marca JUNG onde foi programado para temperatura de 1200°C durante 6 horas numa taxa de crescimento de 10°C/min. As pastilhas eram postas sobre um cadinho e em seguida colocadas dentro do forno. Em seguida, depois da sinterização realizada, aguardava o forno esfriar para finalmente obter as pastilhas das ferritas já rígidas e resistentes, como mostra a figura 34.

Figura 34: Pastilhas Sinterizadas de Ferritas



Fonte: Autoria Própria

Após a obtenção das pastilhas, foi realizado as medições das permissividades já mencionadas no tópico 3.2.2, deu início a etapa de projeto das antenas para uma frequência de 10 GHz, devido as dimensões das pastilhas serem pequenas, o projeto necessita ser para altas frequências para que comporte todo *patch* sobre o substrato. A geometria escolhida foi a retangular devido à simplicidade (Modelo da Linha de Transmissão) do projeto do elemento radiador (*patch*), com alimentação de linha de microfita pelo mesmo motivo (simplicidade de projeto). A alimentação da antena de microfita foi dimensionada segundo Balanis (2009) através da equação 51.

$$Z_0 = \begin{cases} \frac{60}{\sqrt{\epsilon_{\text{ref}}}} \ln \left(\frac{8h}{W_0} + \frac{W_0}{4h} \right), & \frac{W_0}{h} \leq 1 \\ \frac{120\pi}{\sqrt{\epsilon_{\text{ref}}} \left[\frac{W_0}{h} + 1,393 + 0,667 \ln \left(\frac{W_0}{h} + 1,444 \right) \right]}, & \frac{W_0}{h} > 1 \end{cases} \quad (51)$$

Onde L_0 é o comprimento da linha de microfita, Z_0 a impedância da linha e W_0 a largura da linha de microfita. A impedância Z_0 é determinada no projeto através da medida da impedância do conector e da linha de transmissão que será utilizado, normalmente 50

Ω . Utilizando de métodos numéricos é possível determinar o valor de W_0 partindo do valor da impedância do conector.

Após o dimensionamento dos elementos radiadores das antenas juntamente com as devidas linhas de transmissão, parte-se para etapa de simulação utilizando o *software* HFSS[®] (*High Frequency Structural Simulator*). As simulações tiveram como princípio simular primeiramente as ferritas considerando apenas os efeitos da permissividade elétrica (admitindo valor unitário para permeabilidade magnética), depois simular considerando todos os efeitos (elétricos e magnéticos) das ferritas. Utilizou esses procedimentos para que os cálculos para dimensionar os elementos radiadores levem em consideração apenas se forem materiais dielétricos, não magnéticos. O objetivo desses procedimentos é verificar o comportamento das antenas quando é admitido os efeitos magnéticos das antenas, esses procedimentos só foram possíveis porque o HFSS[®] permite que sejam criados diferentes tipos de materiais com suas respectivas propriedades: permissividade elétrica, permeabilidade magnética, tangente de perdas etc.

5.5. IMPLEMENTAÇÃO E TESTES

Após as etapas de produção das ferritas, NiFe_2O_4 , ZnFe_2O_4 e $\text{Ni}_{0,5}\text{Zn}_{0,5}\text{Fe}_2\text{O}_4$, medições de suas respectivas permissividades elétricas, caracterizações, projeto e simulações, deu-se início aos procedimentos de fabricação das antenas de microfita.

Primeiramente foi selecionado o material condutor que seria utilizado no plano de terra e no *patch*. O condutor utilizado foi uma folha de cobre devido sua maleabilidade, facilitando seu manuseio, com espessura de 0,05mm e uma condutividade de $5,8 \cdot 10^7$ S/m. A figura 35 mostra a folha de cobre utilizada.

Figura 35: Folha de Cobre: 0,05mm de espessura.



Fonte: Autoria Própria

Em seguida foi desenhado num programa CAD (*Computed Aided Design*) as geometrias retangulares dos *patches* e das linhas de transmissão com suas respectivas dimensões calculadas da etapa de projeto, bem como os planos de terra que seriam fixadas nas pastilhas de ferritas. Posteriormente, esses desenhos eram colados nas folhas de cobre para que fosse possível os devidos cortes nas dimensões corretas. Com os respectivos cortes das folhas de cobre, partiu-se para a seleção dos conectores que seriam fixados nas pastilhas em contato com a linha de transmissão das antenas. O conectores foram do tipo SMA-KE, fêmea reverso com impedância de 50Ω (Figura 36).

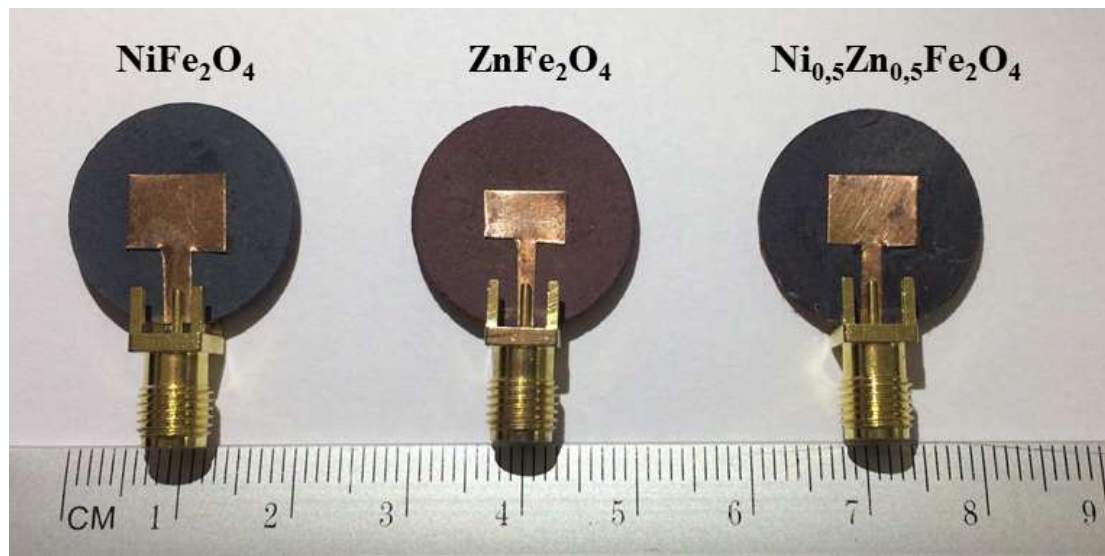
Figura 36: Conector SMA-KE.



Fonte: Autoria Própria

Munido de todos os materiais necessários: folhas de cobre com suas respectivas dimensões e conectores, deu-se início a etapa de finalização da fabricação das antenas, onde consistia em fixar as folhas de cobre nas pastilhas de ferrita com cola branca comercial, devido a fácil remoção caso não seja fixado corretamente que poderia levar a perda das pastilhas, e em seguida fixar os conectores sem a necessidade de solda, como mostra a figura 37.

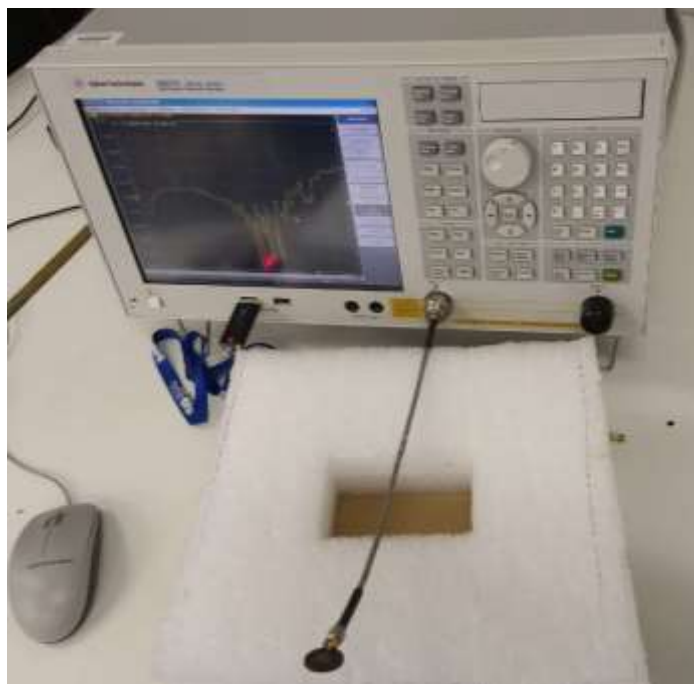
Figura 37: Antenas de Microfita com substrato de Ferrita



Fonte: Autoria Própria

Finalizado a etapa de construção das antenas, estas foram medidas no Laboratório de Medidas em Microondas do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba (IFPB). Foi utilizado o analisador de Redes Vetoriais, Agilent Technologies E5971C, como mostra a figura 38.

Figura 38: Analisador Redes Vetoriais Agilent Technologies E5071C



Fonte: Aatoria Própria

Depois de obtido todos os resultados medidos e simulados, foi realizado uma comparação dos resultados com o objetivo de verificar o comportamento das antenas admitindo as propriedades magnéticas. A comparação foi entra as simulações considerando apenas os efeitos da permissividade elétrica, simulações considerando todos os efeitos elétricos e magnéticos e por fim comparar com os valores medidos.

Infelizmente a caracterização da permeabilidade magnética das ferritas não foi possível realizar devido à falta de acesso a equipamentos viáveis para mediação, porém foram adotados para efeito de simulação, usou-se valores obtidos de artigos de Shi et al. (2013), Teber et al. (2017) e Bueno, Gregori e Nóbrega (2008).

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção serão apresentados os resultados e discussões das etapas de caracterização das pastilhas de ferritas, o projeto das antenas, simulações e medições, comparando e verificando os valores alcançados.

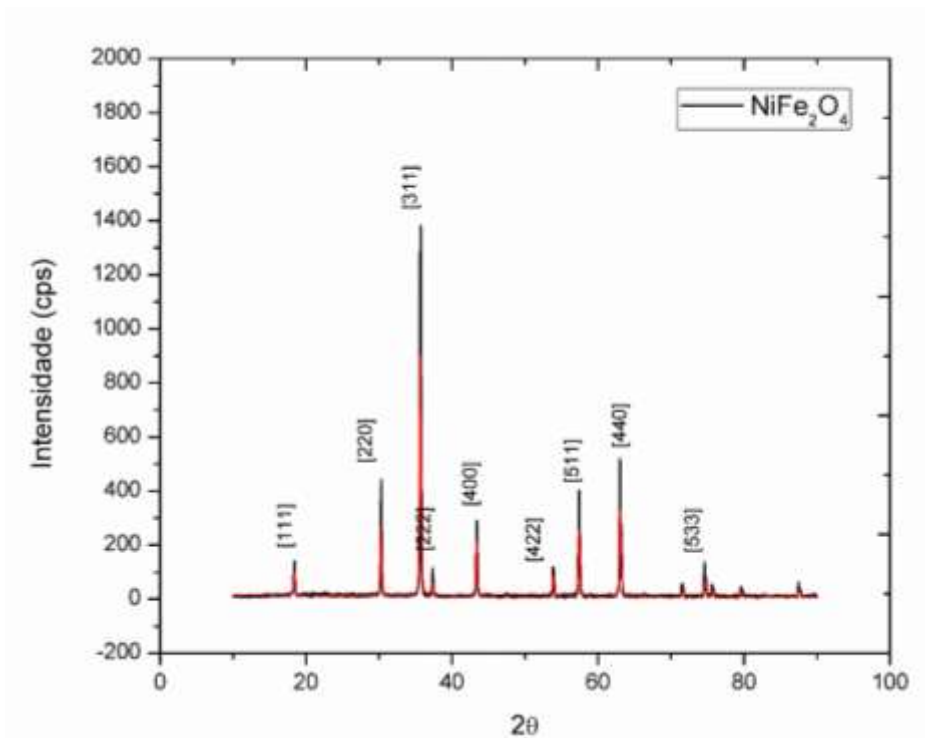
6.2. RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.2.1. Caracterizações Estruturais

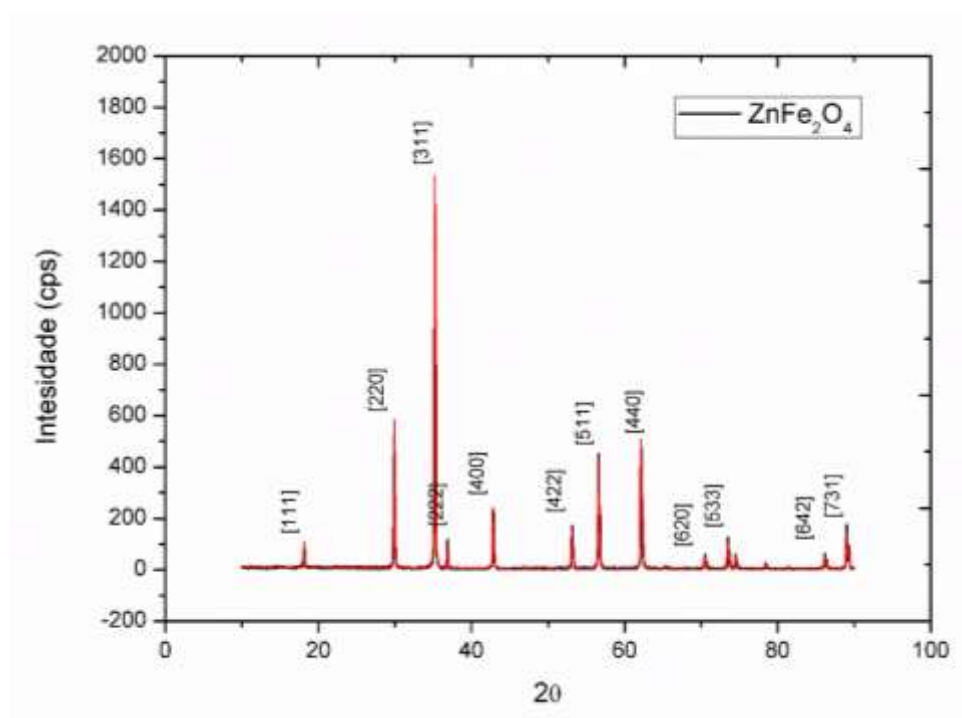
- **Difração de Raios-X (DRX)**

Os difratogramas das amostras de ferritas foram analisadas num range de $2\theta = 10^\circ$ a 90° utilizando $0,02^\circ/s$, como mostra as Figuras 39 a 41.

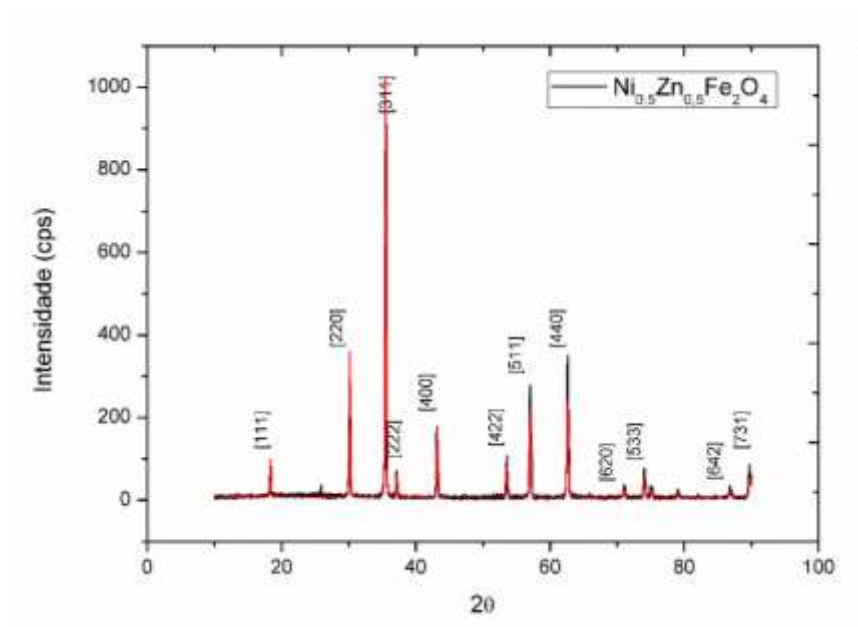
Figura 39: Difratograma da $NiFe_2O_4$



Fonte: Autoria Própria

Figura 40: Difratoograma da $ZnFe_2O_4$ 

Fonte: Autoria Própria

Figura 41: Difratoograma da $Ni_{0,5}Zn_{0,5}Fe_2O_4$ 

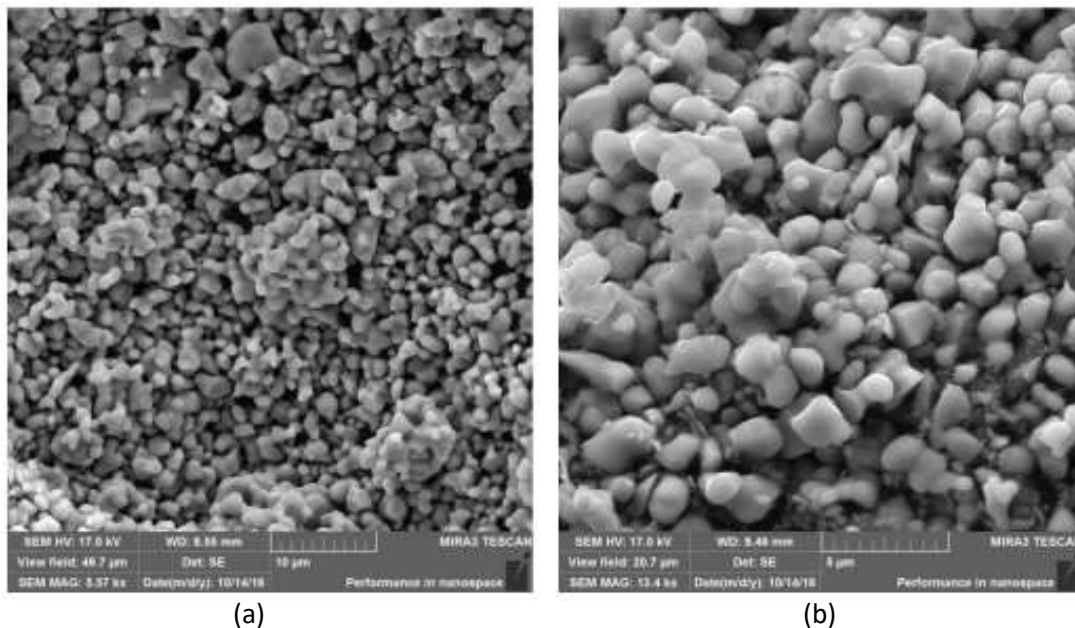
Fonte: Autoria Própria

As Figuras 39 a 41, apresentam os difratogramas das ferritas de NiFe_2O_4 (ICSD – 40040), ZnFe_2O_4 (ICSD – 1010130) e $\text{Ni}_{0,5}\text{Zn}_{0,5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ (ICSD – 1100112) respectivamente já refinadas através do *software* MAUD. Em todas as amostras, foram utilizados o método de refinamento *Rietveld*, em que foi possível verificar uma boa correlação entre os difratogramas experimentais (linha preta) e os refinados (linha vermelha) para as três ferritas indicando uma alta confiabilidade dos resultados obtidos. A formação das fases cristalinas das ferritas é verificado através dos picos de intensidade, na qual pode-se verificar a ausência de impurezas.

- **Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV)**

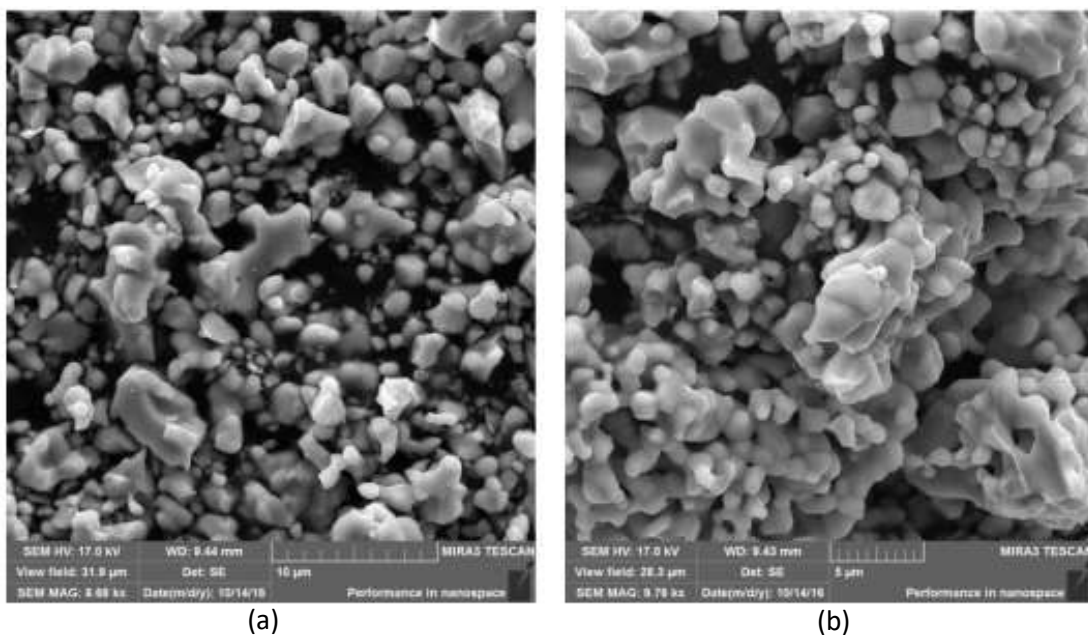
Em seguida serão apresentadas as imagens obtidas no microscópio eletrônico de varredura (MEV) das ferritas. Através deste equipamento pode-se observar a morfologia das partículas. A Figura 42 a 44 apresentam as imagens das NiFe_2O_4 , ZnFe_2O_4 e $\text{Ni}_{0,5}\text{Zn}_{0,5}\text{Fe}_2\text{O}_4$, respectivamente.

Figura 42: Imagens obtida por MEV da NiFe_2O_4 (a) Escala $10\mu\text{m}$ (b) Escala $5\mu\text{m}$



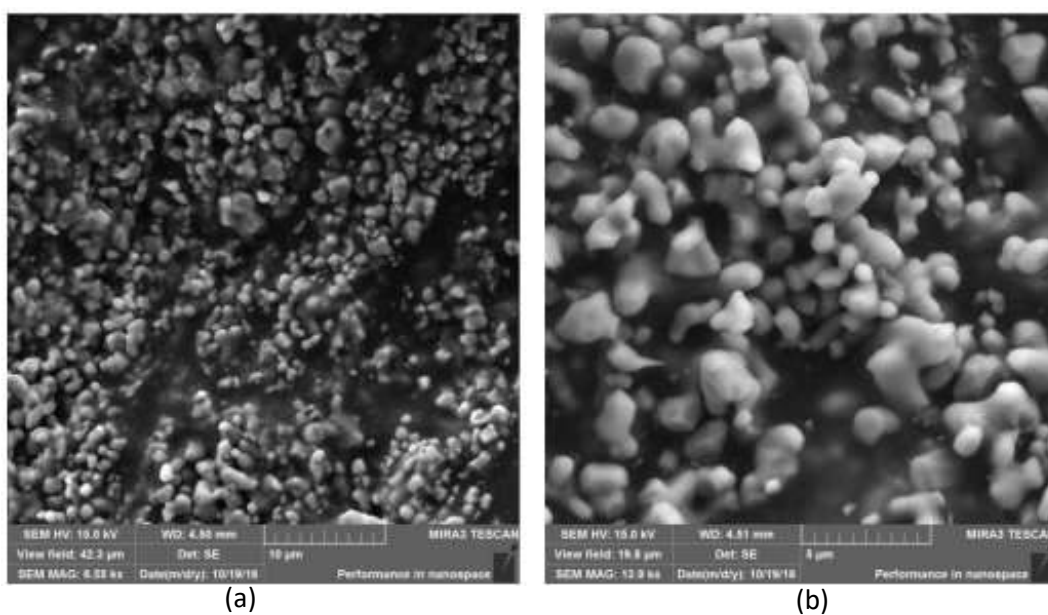
Fonte: Autoria Própria

Figura 43: Imagens obtida por MEV da $ZnFe_2O_4$ (a) Escala $10\mu m$ (b) Escala $5\mu m$



Fonte: Autoria Própria

Figura 44: Imagens obtida por MEV da $Ni_{0,5}Zn_{0,5}Fe_2O_4$ (a) Escala $10\mu m$ (b) Escala $5\mu m$



Fonte: Autoria Própria

Por meio das figuras 42 a 44 pode-se verificar as imagens obtidas no MEV das amostras de ferritas $NiFe_2O_4$, $ZnFe_2O_4$ e $Ni_{0,5}Zn_{0,5}Fe_2O_4$, respectivamente, nas escalas de $10\mu m$ (a) e $5\mu m$ (b). É possível observar a distribuição do tamanho uniforme das partículas e a porosidade do material. As ferritas de zinco e níquel-zinco se mostraram

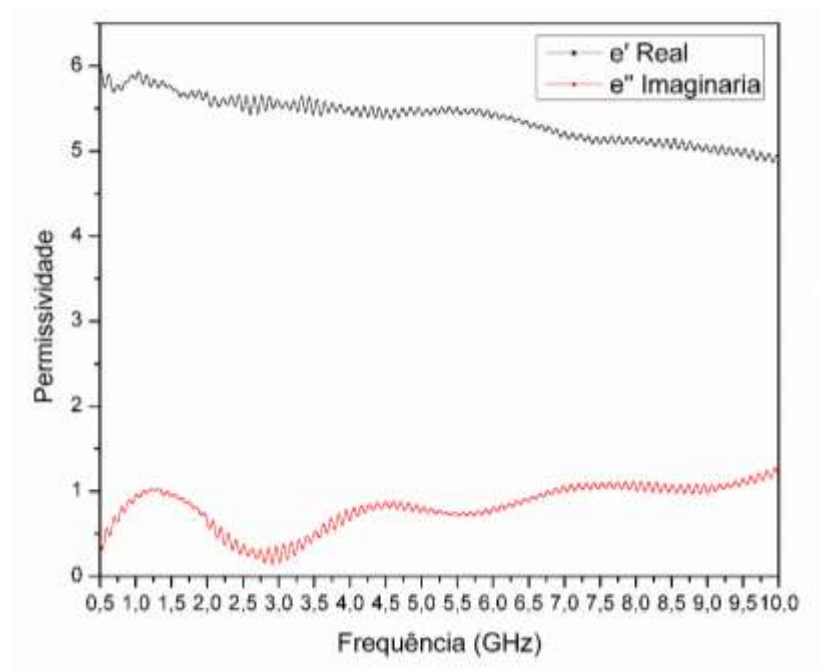
mais porosas do que em relação a ferrita níquel e os grãos da ferrita de zinco apresentaram-se com tamanhos bem mais variados em comparação com as outras ferritas.

6.2.2. Caracterizações Elétrica e Magnética

- Permissividade Elétrica

Como descrito na seção 3.2.2, as permissividades elétricas das ferritas foram analisadas numa faixa de frequência de 0,5 GHz a 10GHz com passo de 0,00625. O Comportamento das ferritas medidas, em relação a permissividade elétrica é mostrado nas figuras 45 a 47 referente as ferritas de Níquel, Zinco e Níquel-Zinco, respectivamente.

Figura 45: Permissividade elétrica da NiFe_2O_4 .

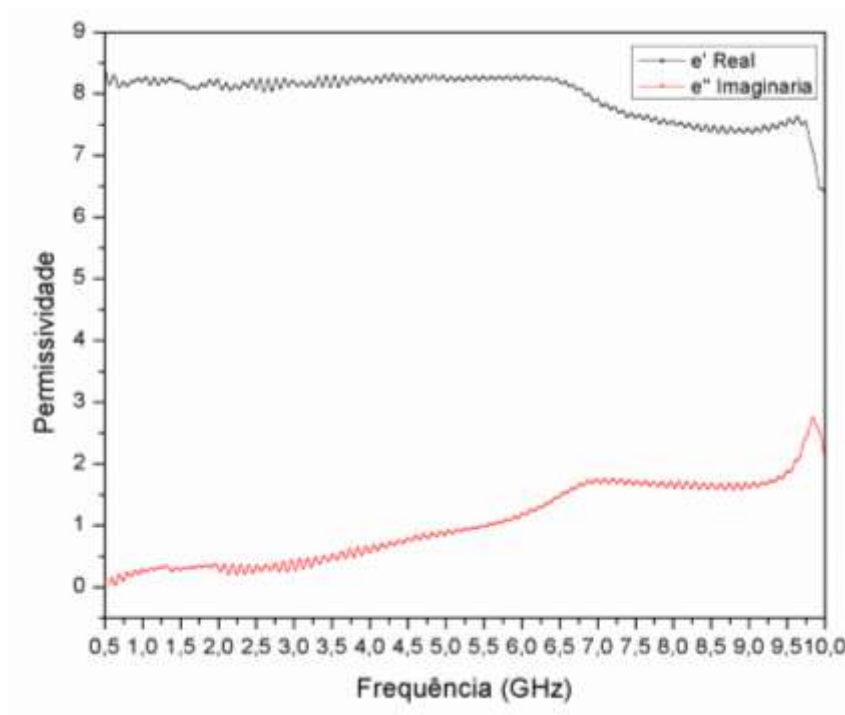


Fonte: Autoria Própria

Através da figura 45 pode-se observar que ocorre uma diminuição dos valores da parte real da permissividade relativa na medida que aumenta a frequência. Já na parte imaginária observa-se uma oscilação de permissividade até 4,5GHz para em seguida ocorre uma pequena elevação no valor da parte imaginária.

Para o projeto da antena de microfita foi utilizado um valor médio obtido apenas observando graficamente a figura 45, onde se chega aos valores $\epsilon' = 5,55$ e $\epsilon'' = 0,55$. Tomando esses valores como referência e utilizando da equação 45 para o cálculo da tangente de perdas, obtém-se o valor de $\tan\delta = 0,09909$.

Figura 46: Permissividade elétrica da ZnFe_2O_4 .

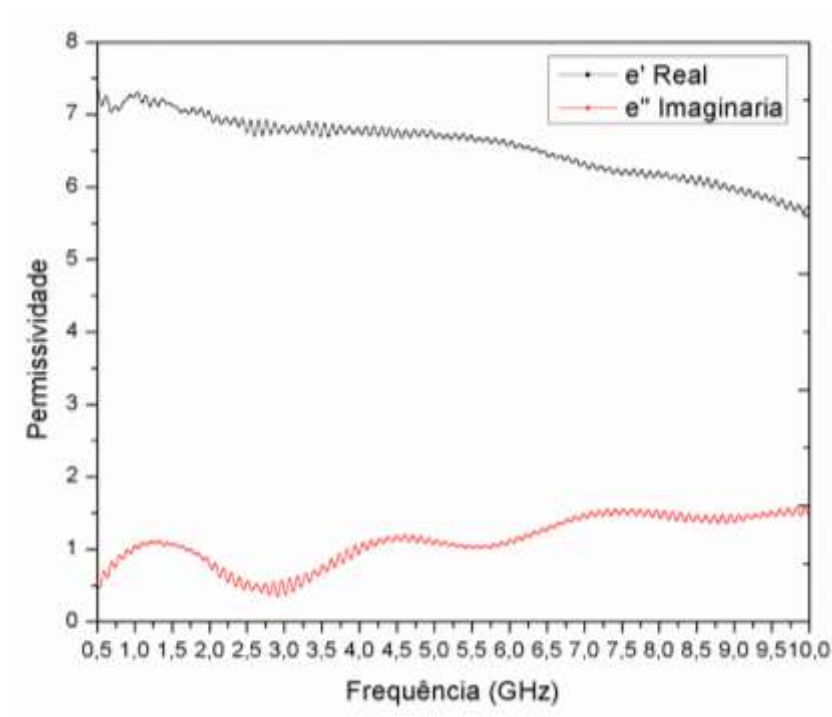


Fonte: Autoria Própria

Analisando a Figura 46 referente a permissividade da ZnFe_2O_4 , pode-se verificar uma constância dos valores da parte real até aproximadamente a frequência de 6,5GHz, em seguida a permissividade têm uma diminuição considerada. Com relação a parte imaginaria da permissividade elétrica, pode-se observar o contrário, ocorre o aumento dos valores da permissividade a medida que a frequência também é aumentada.

Para efeitos de projeto da antena de microfita, foi utilizado a mesma ideia para ferrita de níquel, tomar um valor médio observado apenas graficamente, onde obtém os valores: $\epsilon' = 8,45$ e $\epsilon'' = 0,85$. Calculado a tangente de perdas elétricas tem-se: $\tan\delta = 0,1006$.

Figura 47: Permissividade elétrica da $\text{Ni}_{0,5}\text{Zn}_{0,5}\text{Fe}_2\text{O}_4$.



Fonte: Autoria Própria

Pela figura 47, pode-se avaliar o comportamento da permissividade elétrica da $\text{Ni}_{0,5}\text{Zn}_{0,5}\text{Fe}_2\text{O}_4$, durante toda a faixa de frequência medida é possível observar que a parte real da permissividade tem uma diminuição dos seus valores, iniciando com valor próximo a 7,4 alcançando aproximadamente 5,5 na parte real em 10GHz. Com relação a parte imaginaria, observa-se uma oscilação dos valores da permissividade até aproximadamente na frequência 4,5GHz para em seguida ocorrer uma pequena elevação.

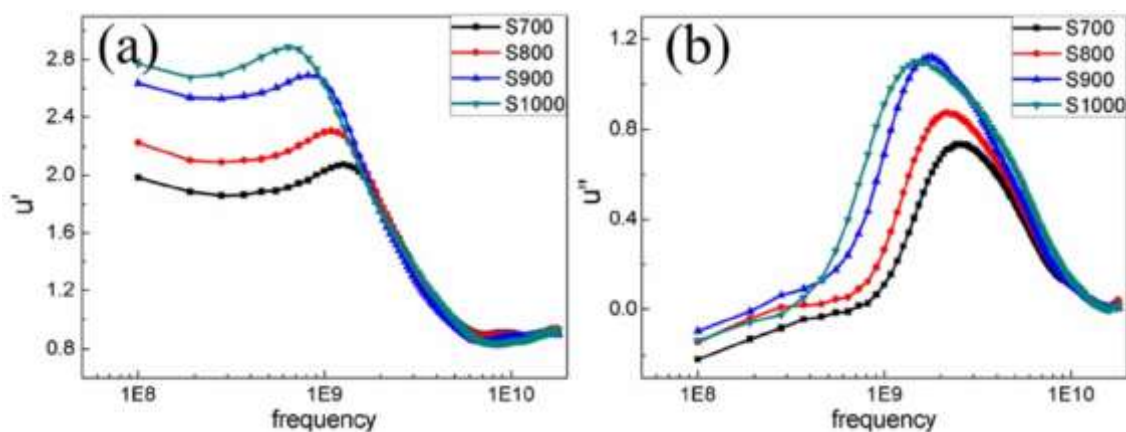
Para o projeto da antena utilizando esta ferrita, foi adotado o valor de $\epsilon' = 6,85$ e $\epsilon'' = 1,10$ apenas observando a figura 47 tomando um valor médio, com isso pode-se calcular a tangente de perdas: $\tan\delta = 0,16058$.

- Permeabilidade Magnética

Conforme mencionado na metodologia, não foi possível realizar as medições das permeabilidades magnéticas das ferritas, contudo, para efeito de simulações foram utilizados valores obtidos de artigos no objetivo de ter uma aproximação dos valores a serem usados.

A seguir serão citados os valores utilizados e suas respectivas referências das devidas permeabilidades das ferritas utilizadas.

Figura 48: Permeabilidade Magnética da NiFe_2O_4 (a) Real, (b) Imaginária.

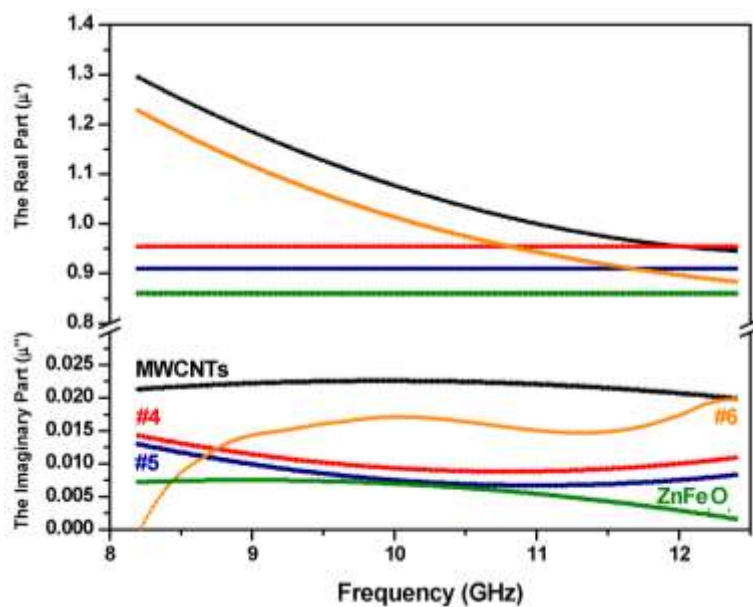


Fonte: Shi et al. (2013)

A figura 48 apresenta dois gráficos que mostram os valores da permeabilidade magnética da ferrita de níquel parte real e imaginária relacionado a diferentes temperaturas de calcinação representado na legenda pelas letras S700 (700°C), S800 (800°C) e assim por diante. Esses gráficos foram tirados de Shi et al. (2013).

Neste trabalho foi utilizado os valores representados na temperatura de calcinação de 1000°C (S1000), com isso, tem-se: $\mu'=2,6$ e $\mu''=0,8$. Calculado a tangente de perdas através da equação 50, obtém-se: $\tan\delta=0,30769$

Figura 49: Permeabilidade Magnética da $ZnFe_2O_4$

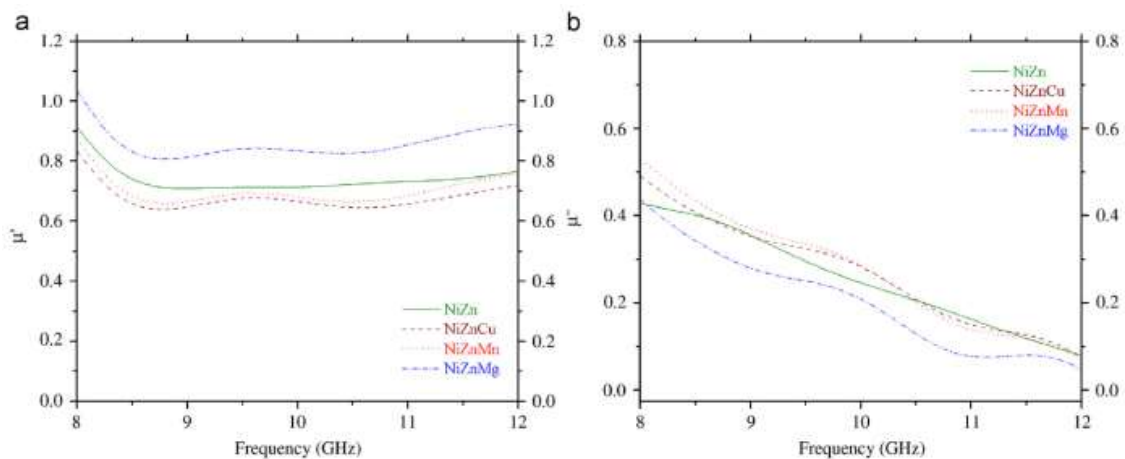


Fonte: Teber et al. (2017)

A figura 49 mostra a parte real e imaginária da permeabilidade magnética da ferrita de zinco representada pela curva de cor verde. As outras curvas, que não são de interesse para este trabalho, representam nanocompósitos de carbono multi-paredes comerciais (MWCNTs) em várias proporções com uma matriz aglutinante de parafina.

Neste trabalho foi utilizado valores médios com base na figura 49, obtendo-se $\mu'=0,86$ e $\mu''=0,074$ com tangente de perdas: $\tan\delta=0,08604$.

Figura 50: Permeabilidade Magnética da $Ni_{0,5}Zn_{0,5}Fe_2O_4$ a) Real, b) Imaginária



Fonte: Bueno, Gregori e Nóbrega (2008)

Para os valores da permeabilidade da $Ni_{0,5}Zn_{0,5}Fe_2O_4$ foram utilizados a figura 50 que mostra a parte real (a) e imaginária (b) da permeabilidade magnética de diferentes ferritas. A curva de cor verde representa a ferrita NiZn, uma das utilizada neste trabalho, que corresponde: $\mu'=0,75$ e $\mu''=0,28$ com tangente de perdas $\tan\delta=0,03733$ segundo Bueno, Gregori e Nóbrega (2008).

6.2.3. Projeto e Simulações

Depois da etapa de prensagem e sinterização das ferritas, foram alcançadas pastilhas cilíndricas com 10mm de diâmetro cada e espessuras: 1,84mm, 2,00mm e 1,66mm para $NiFe_2O_4$, $ZnFe_2O_4$ e $Ni_{0,5}Zn_{0,5}Fe_2O_4$ respectivamente. A partir dos valores das espessuras das pastilhas, permitiu-se a realização do projeto das antenas de microfita com as respectivas dimensões apresentadas na tabela 4 (as variáveis dimensionais têm como base a estrutura da figura 1, onde W_0 e L_0 correspondem a largura e comprimento da linha de transmissão respectivamente).

Tabela 4: Dimensões das antenas projetadas com diferentes pastilhas de ferritas para a frequência de 10 GHz e impedância característica de 50 Ω .

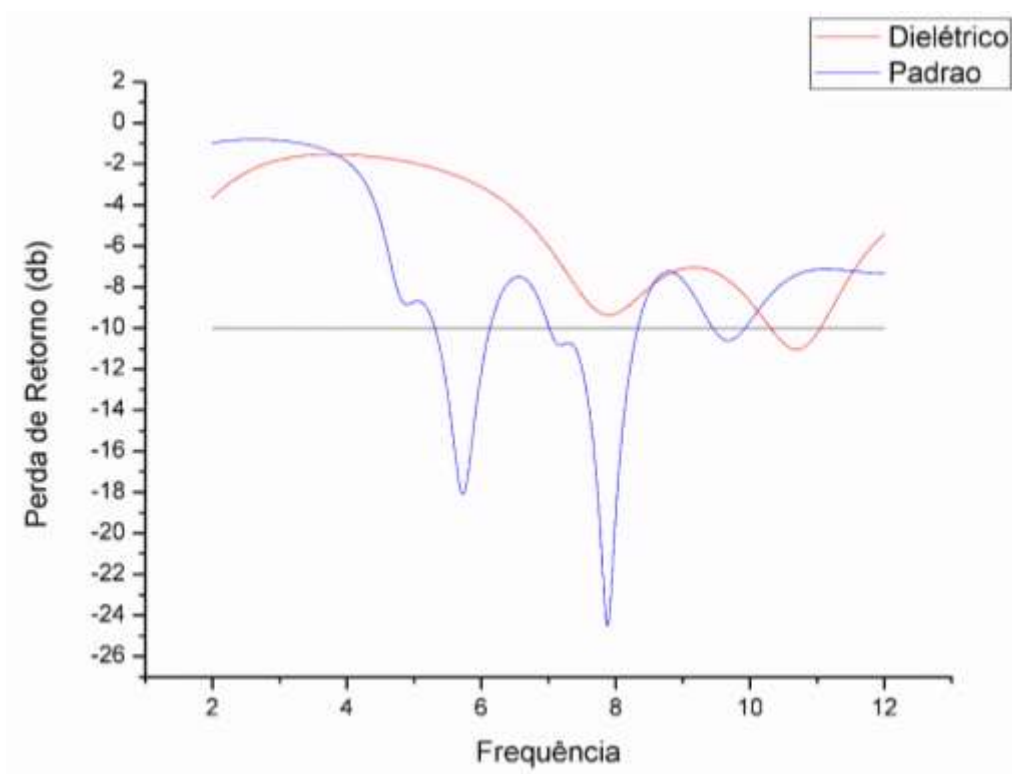
Ferrita	W(mm)	L(mm)	W₀(mm)	Lo(mm)	H(mm)
NiFe ₂ O ₄	8,2886	6,5560	2,1438	3,5499	1,84
ZnFe ₂ O ₄	6,9001	4,3209	1,4038	2,9407	2,00
Ni _{0,5} Zn _{0,5} Fe ₂ O ₄	7,5713	6,0562	1,5259	3,2096	1,66

Fonte: Autoria Própria

Observando a tabela 4, nota-se que os valores das dimensões variam conforme altera o substrato de ferrita projetada, isso ocorre devido a variação da permissividade elétrica utilizada bem como as espessuras das pastilhas. Com os valores das dimensões obtidas, as antenas foram simuladas e os valores de coeficiente de reflexão são apresentados a seguir.

A figura 51 mostra uma comparação do comportamento da perda de retorno da antena de NiFe₂O₄. Foi comparado a simulação considerando apenas os efeitos da permissividade elétrica (Dielétrico) com a simulação admitindo o valor da permeabilidade magnética (Padrão) apresentado no tópico anterior, tudo na faixa de frequência de 2 GHz até 12 GHz, a mesma faixa utilizada na medição.

Figura 51: Perda de retorno simulado da antena de NiFe₂O₄

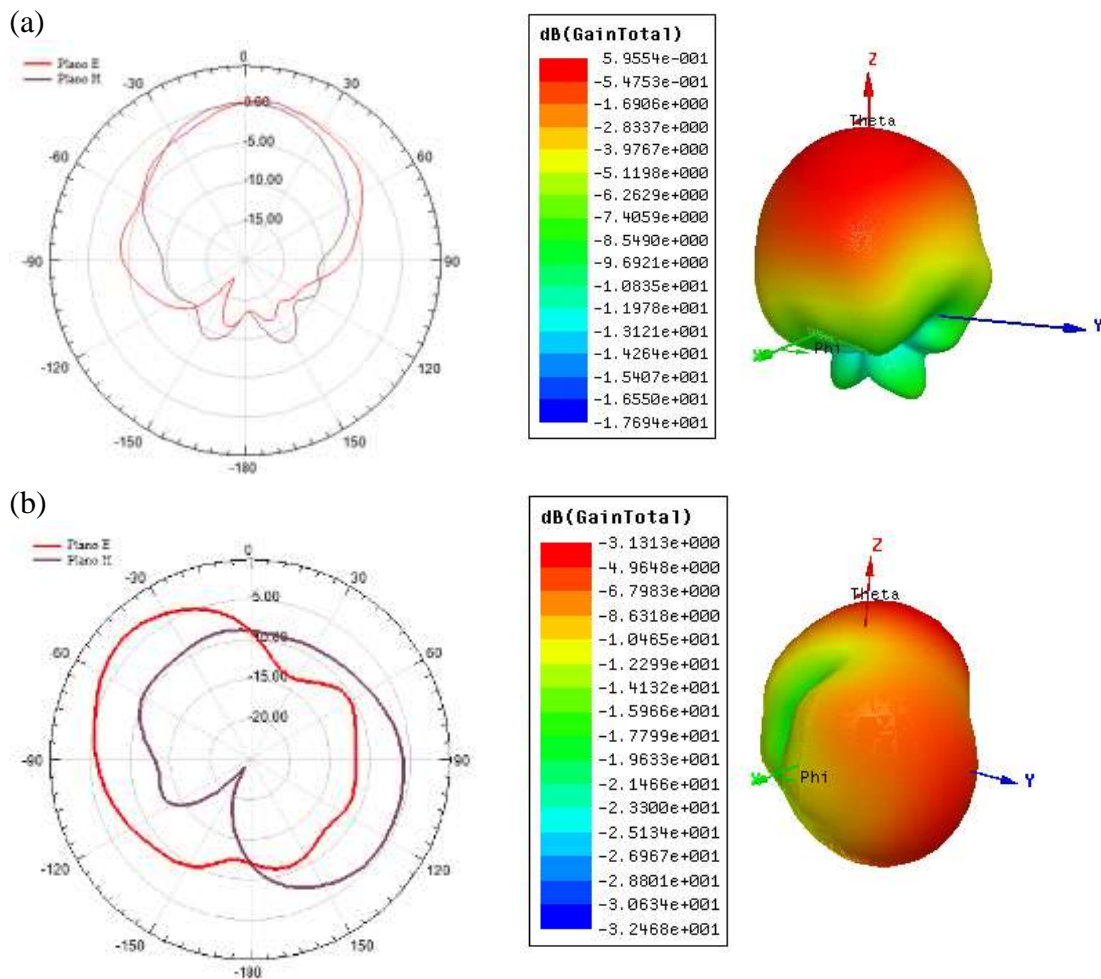


Fonte: Autoria própria

Por meio da análise da figura 51 é possível observar que as duas simulações ressoaram abaixo de 10 dB. A frequência de ressonância da antena “dielétrica” ocorre em torno de 10,71 GHz (-11,0472 dB) com largura de banda de 831,8MHz (10,2570 GHz a 11,0888 GHz), já para antena padrão que considera a permeabilidade magnética, obteve frequências de ressonância de 5,722 GHz (-17,918 dB) e 7,919 GHz (-24,597 dB) com larguras de banda 810,6 MHz (5,3170 GHz a 6,1276 GHz) e 1,365 GHz (6,9594 GHz a 8,3245 GHz). Comparando a perda de retorno das duas antenas, pode-se observar uma redução na frequência de ressonância quando é admitido o valor da permeabilidade magnética da ferrita de níquel bem como o aumento da perda de retorno.

A figura 52 apresenta os diagramas de radiação 2D e 3D das simulações das antenas de NiFe₂O₄.

Figura 52: Diagrama de Radiação 2D e 3D das antenas de NiFe_2O_4 (a) Dielétrico, (b) Padrão na frequência 10,71 GHz e 7,919 GHz, respectivamente.

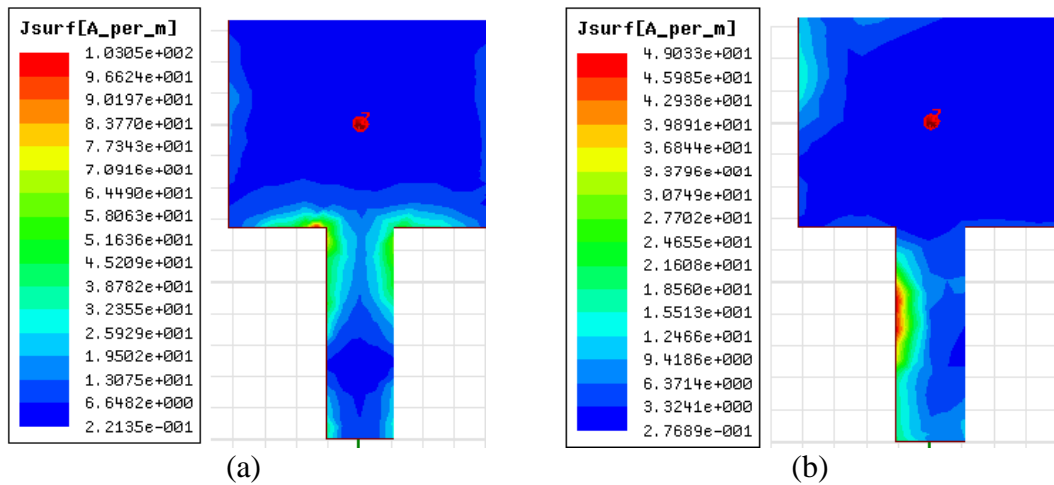


Fonte: Autoria Própria

Através da figura 52 é possível observar que ao considerar os efeitos da permeabilidade magnética (b) o diagrama de radiação sofre significativas variações tanto na sua forma de radiação quanto no valor do ganho da antena. Na figura 52 (a), a antena dielétrica apresentou característica *broadside*, onde a radiação da potência transmitida é na direção perpendicular ao *patch* da antena, já com relação a figura 52 (b), essa característica praticamente desaparece bem como uma considerável redução do ganho.

A figura 53 mostra a disposição da densidade de corrente nas antenas de microfita projetadas nas respectivas frequências de ressonância.

Figura 53: Densidade de corrente das antenas de NiFe_2O_4 (a) Dielétrico, (b) Padrão. na frequência 10,71 GHz e 7,919 GHz, respectivamente.

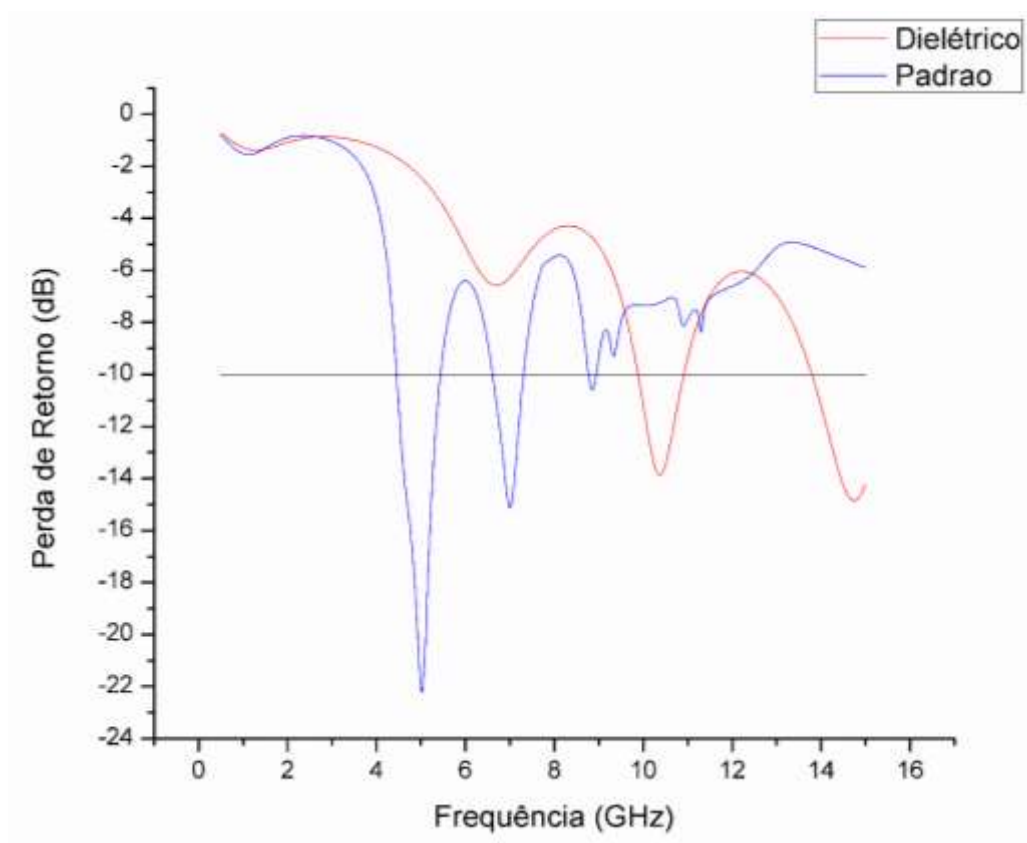


Fonte: Autoria Própria

A partir da Figura 53, observa-se que o comportamento da densidade linear de corrente no *patch* (vista superior) entre as antenas, modifica quando é considerado os efeitos da permeabilidade magnética (b). Na Figura 53 (a) é observado uma maior concentração da densidade linear de corrente na parte superior da linha de alimentação bem com na parte inferior do *patch*, as demais regiões apresentam uma distribuição uniforme. No item (b) a situação muda, a densidade de corrente se concentra no lado esquerdo na linha de alimentação e na parte superior esquerda do *patch*.

O mesmo raciocínio foi utilizado para analisar a antena de microfita com ferrita de zinco, considerando apenas os efeitos da permissividade elétrica (dielétrico) comparando com os efeitos quando leva em consideração os efeitos da permeabilidade magnética (padrão). A figura 54 mostra esse efeito na perda de retorno das antenas na faixa de frequência de 0,5GHz a 15 GHz.

Figura 54: Perda de retorno simulado da antena de $ZnFe_2O_4$



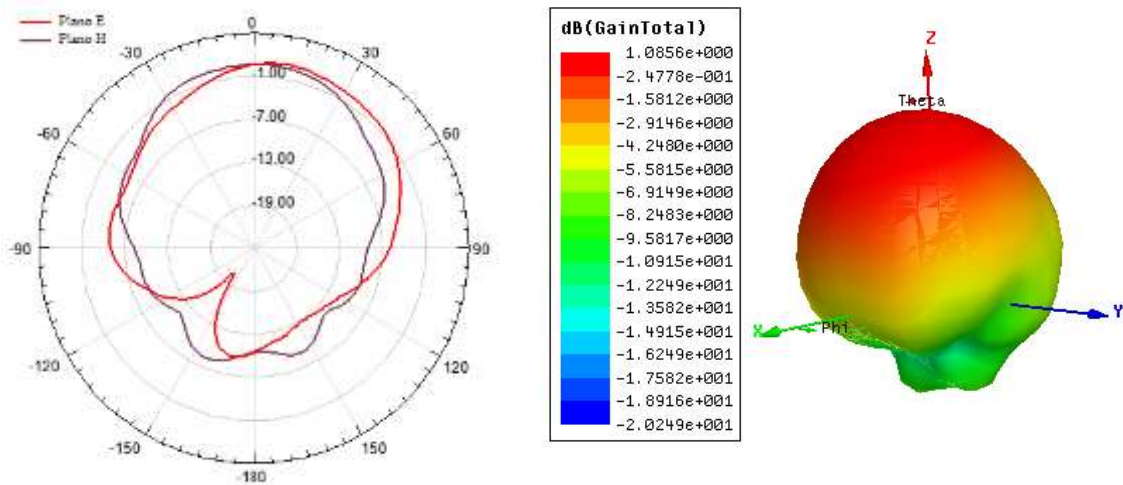
Fonte: Autoria Própria

Por meio da Figura 54 é possível observar que ambas antenas ressoaram, a antena dielétrica obteve uma frequência de ressonância de 10,357 GHz (-13,913dB) com largura de banda de 1,0438GHz (10,9293 GHz a 9,8855GHz). Com relação a antena padrão, obteve-se dois pontos de ressonância, um na frequência de 5,022 GHz (-22,019 dB) com largura de banda de 1,0677 GHz (5,4265 GHz a 4,3588GHz) e o outro em 6,958 GHz (-14,992 dB) com largura de banda de 735,8 MHz (6,5623 GHz a 7,2981 GHz). Analisando a figura 55, pode-se observar que ao considerar os efeitos da permeabilidade magnética da ferrita de zinco, ocorre a redução da frequência de operação da antena.

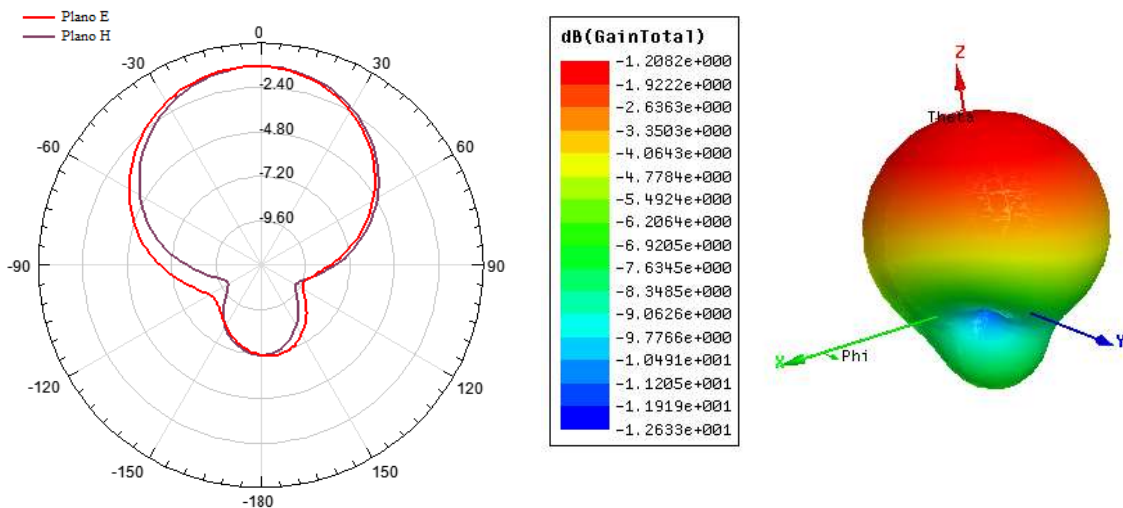
A figura 55 apresenta os diagramas de radiação 2D e 3D das simulações das antenas de $ZnFe_2O_4$.

Figura 55: Diagrama de Radiação 2D e 3D das antenas de ZnFe₂O₄ (a) Dielétrico, (b) Padrão para as frequências 10,357 GHz e 5,022 GHz, respectivamente.

(a)



(b)

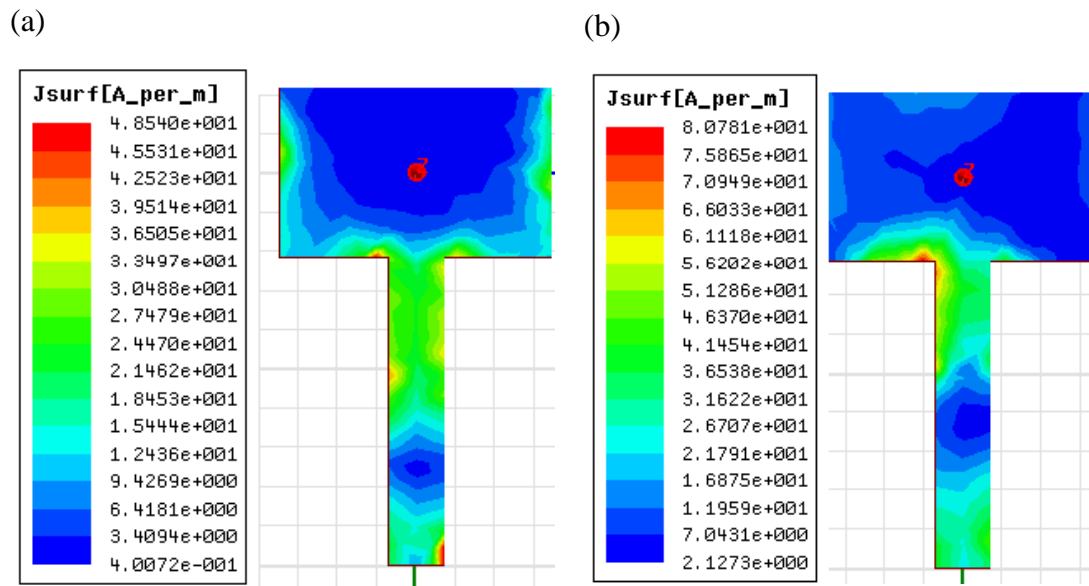


Fonte: Autoria Própria

Observando a Figura 55, é possível verificar ao levar em consideração os efeitos da permeabilidade magnética ocorre uma redução do ganho da antenna e alteração da configura de radiação da antenna. As duas antenas, dielétrica e a padrão apresentaram característica de radiação *broadside*, em que a potência transmitida está na direção normal ao *patch*.

A Figura 56 mostra a densidade linear de corrente das duas antenas na frequência de ressonância.

Figura 56: Densidade de corrente das antenas de ZnFe₂O₄ (a) Dielétrico, (b) Padrão nas frequências 10,357 GHz e 5,022 GHz, respectivamente.

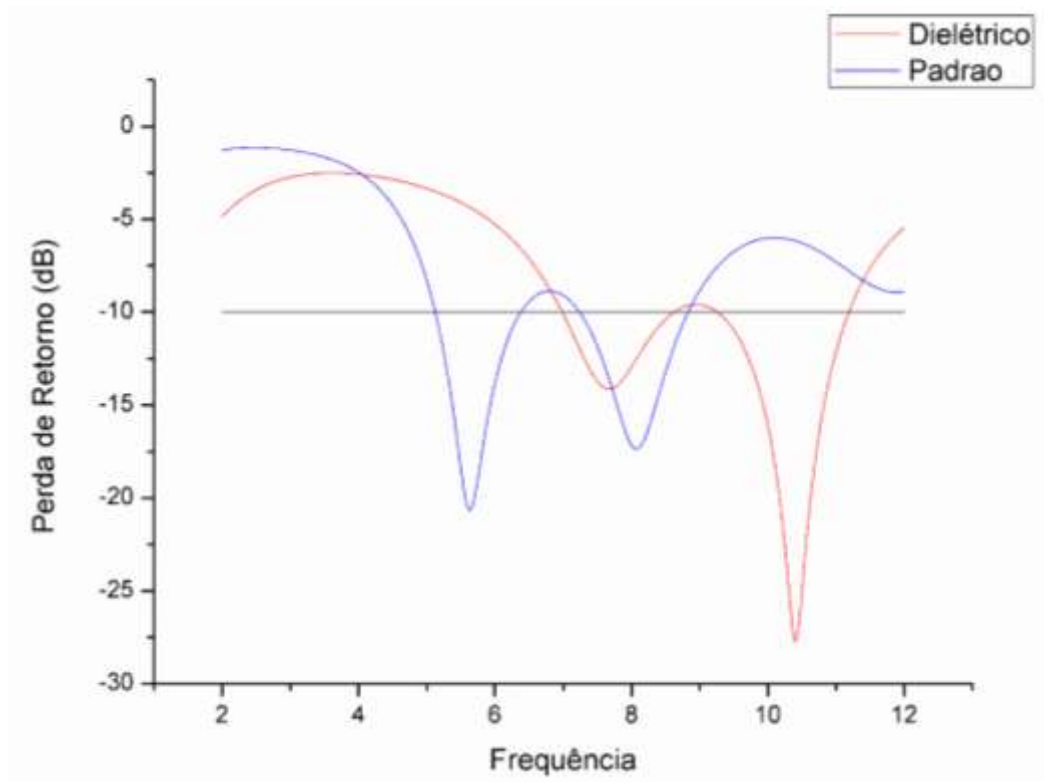


Fonte: Autoria Própria

Analisando a Figura 56 é possível verificar uma maior concentração de densidade linear de corrente na linha de alimentação em ambas as antenas, na figura 58 (a) as laterais do *patch* (direita e esquerda) apresentaram uma densidade de corrente maior em relação a figura 58 (b), mostrando que a permeabilidade magnética da ferrita de zinco influencia da distribuição da densidade de corrente.

Por último, utilizando a mesma linha de raciocínio é analisado a seguir as simulações dos mesmos parâmetros para uma antena de microfita com substrato de Ni_{0,5}Zn_{0,5}Fe₂O₄. A Figura 57 mostra o efeito da permeabilidade magnética na perda de retorno na antena.

Figura 57: Perda de retorno simulado da antena de $\text{Ni}_{0,5}\text{Zn}_{0,5}\text{Fe}_2\text{O}_4$.



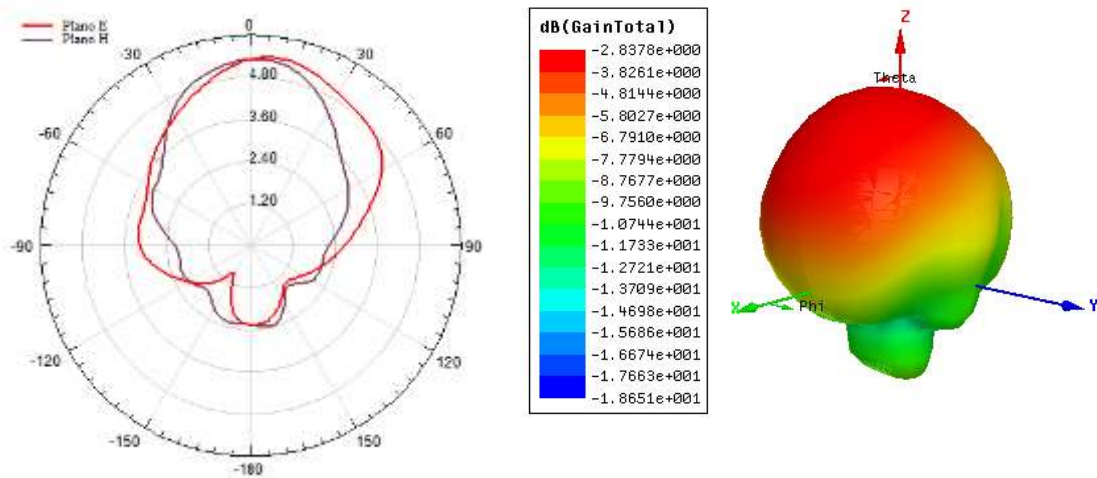
Fonte: Autoria Própria

Por meio da Figura 57 é possível observar que ambas as antenas de ferrita ressoam abaixo de 10 dB. A antena dielétrica teve uma frequência de ressonância de 10,427 GHz (-28,011 dB) com uma largura de banda de 1,9494 GHz (9,2417 GHz a 11,1911 GHz). Na antena padrão a primeira frequência de ressonância foi constatada em 5,552 GHz (-20,513 dB) com uma largura de banda de 1,284 GHz (5,1038 GHz a 6,3878 GHz), obteve-se outro ponto de ressonância em 8,055 GHz (-17,413 dB) com largura de banda de 1,5784 GHz (7,2367 GHz a 8,8151 GHz). Seguindo os mesmos efeitos das antenas anteriores, ao se considerar a permeabilidade magnética da antena, ocorreu a redução da frequência de ressonância e um estreitamento na largura de banda.

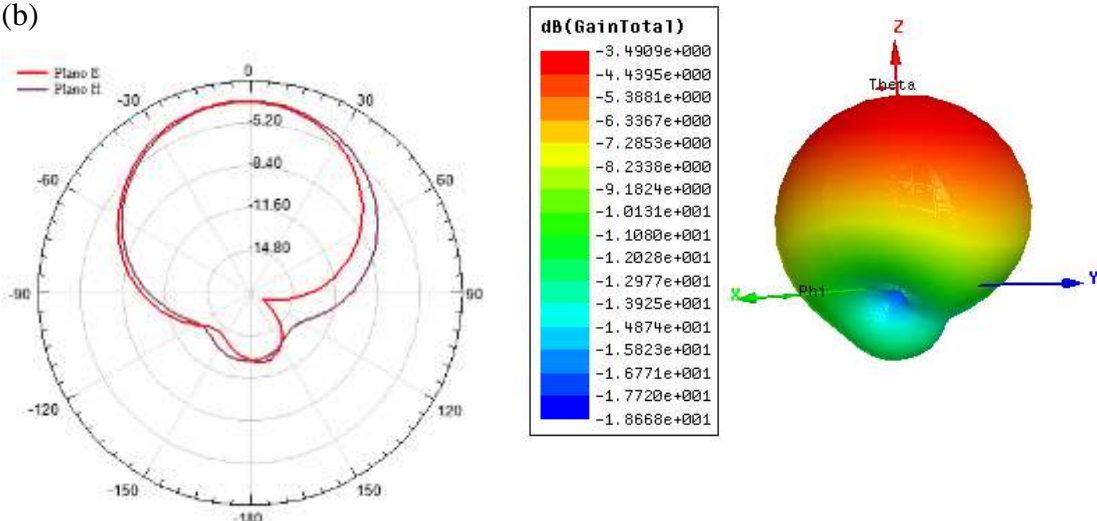
A seguir, na Figura 58 é apresentado os diagramas de radiação 2D e 3D da antena.

Figura 58: Diagrama de Radiação 2D e 3D das antenas de $\text{Ni}_{0,5}\text{Zn}_{0,5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ (a) Dielétrico, (b) Padrão nas frequências 10,427 GHz e 5,552 GHz, respectivamente.

(a)



(b)

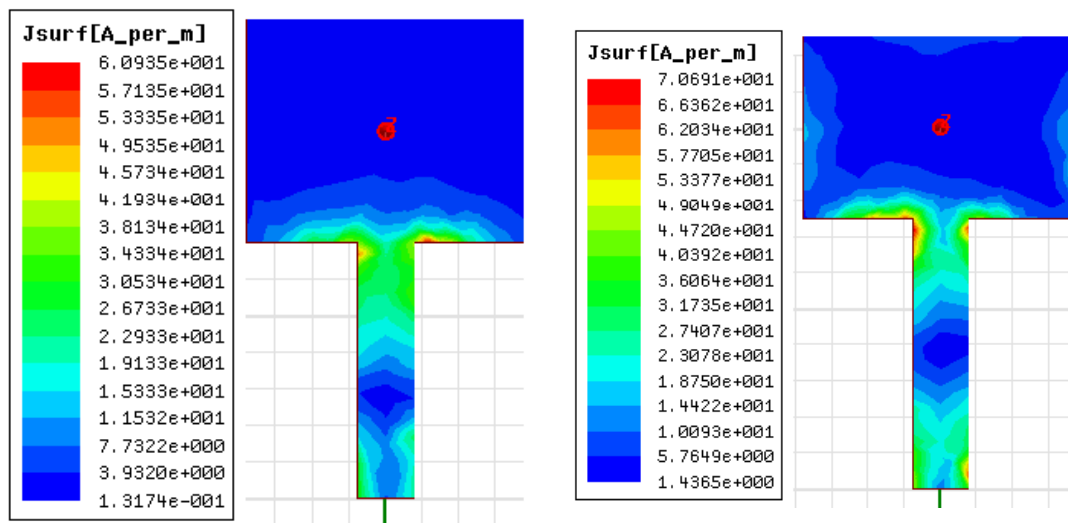


Fonte: Autoria Própria

Por meio da Figura 58 pode-se observar que ao ser considerado a permeabilidade magnética da ferrita, ocorre alteração na configuração do diagrama de radiação juntamente com o valor ganho da antena. Ambas obtiveram característica de radiação na direção normal ao *patch*, propriedade que é semelhante nas antenas de microfita convencional.

A Figura 59 apresenta as características da densidade linear de corrente das antenas.

Figura 59: Densidade de corrente das antenas de $\text{Ni}_{0,5}\text{Zn}_{0,5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ (a) Dielétrico, (b) Padrão nas frequências 10,427 GHz e 5,552 GHz, respectivamente.



Fonte: Autoria Própria

Comparando as Figuras 59 (a) e (b), pode-se verificar que ambas as antenas tiveram uma distribuição de densidade de corrente semelhante, onde a maior concentração de densidade de corrente se encontra na linha de alimentação das antenas mostrando nas partes mais claras da figura.

O próximo tópico apresenta uma comparação dos valores simulados com os medidos das perdas de retorno.

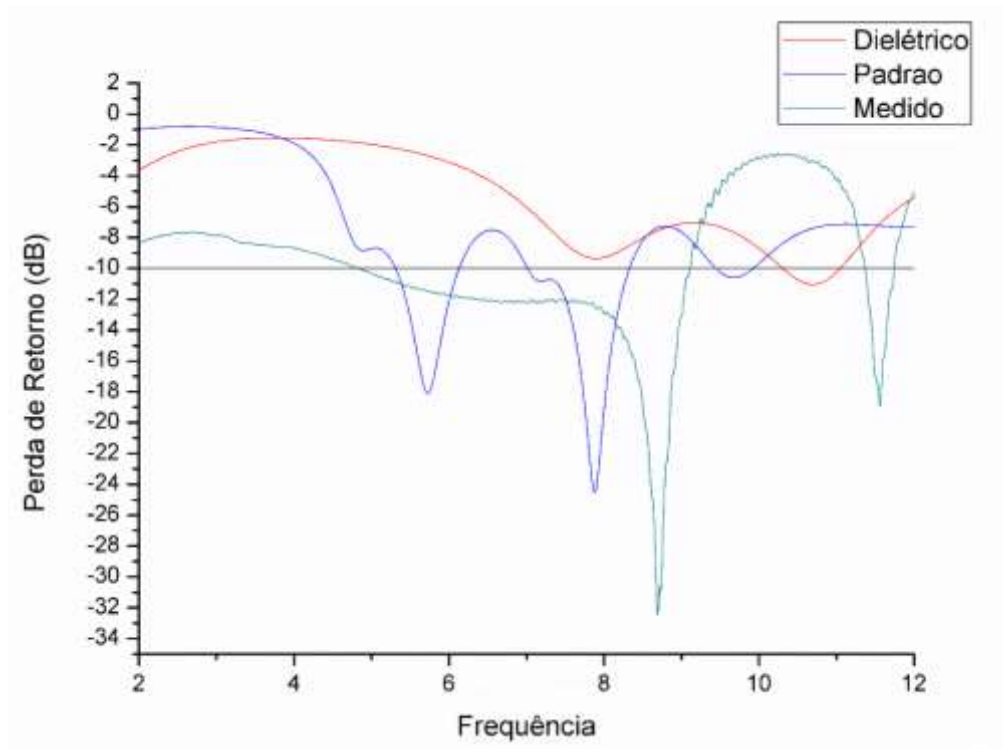
6.2.4. Comparação das simulações com os valores medidos.

Através dos resultados obtidos na etapa de simulações das antenas de microfita e dos resultados alcançados nas medições realizadas com equipamentos adequados, mostrado no tópico de metodologia, pode-se observar algumas consequências ao aplicarmos ferritas no substrato de antenas de microfita.

- Perda de retorno

A Figura 60 mostra a comparação da perda de retorno dos valores simulados e medido para antenna de NiFe_2O_4 na faixa de frequência de 2GHz a 12GHz.

Figura 60: Comparação da perda de retorno da antenna de NiFe_2O_4 .

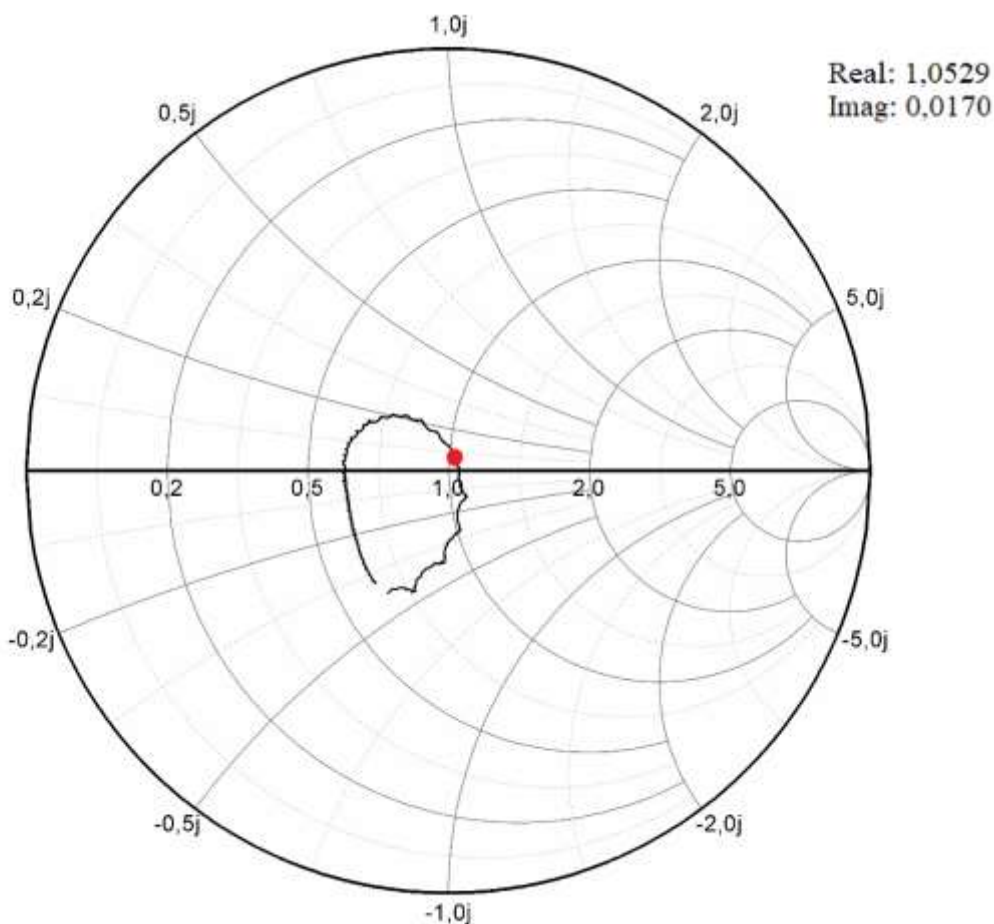


Fonte: autoria própria.

Por meio da Figura 60, pode-se observar que a antena produzida com pó de NiFe_2O_4 ressoou abaixo de 10 dB na frequência de 8,704 GHz (-32,255 dB) com largura de banda de 4,297GHz (4,8190 GHz a 9,1169 GHz). Como esperado, houve a redução da frequência de operação em relação a antena simulada dielétrica, porém com uma frequência maior do que a padrão. Esse efeito provavelmente tenha ocorrido no momento de atribuir o valor da permeabilidade magnética da ferrita de níquel, que corresponde a um valor aproximado.

A seguir a Figura 61 mostra o gráfico da carta de Smith da antena de NiFe_2O_4 na frequência de ressonância.

Figura 61: Carta de Smith medida da antena NiFe_2O_4

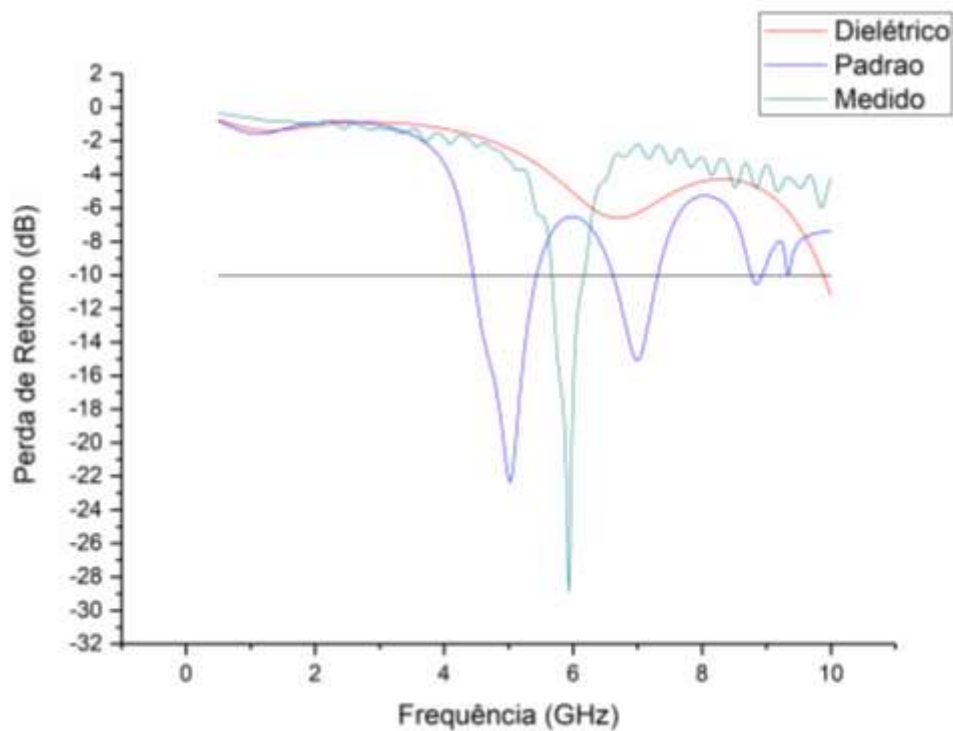


Fonte: autoria própria

A Figura 61 apresenta a carta de Smith com os valores normalizados em 50Ω (valor de projeto para linha de transmissão). Na frequência de ressonância $8,704 \text{ GHz}$ a impedância de entrada apresentou o valor de $z=52,645+j0,85 \Omega$ (valores desnormalizados), resultado satisfatório pois a parte real está próxima de 50 e a imaginária próximo do zero significando um ótimo casamento de impedância, conseqüentemente as perdas por reflexão do sinal de entrada são baixas.

A seguir, na Figura 62 é mostrado a comparação da perda de retorno simulado e medido da antena de ZnFe_2O_4 na faixa de frequência de $0,5\text{GHz}$ a 10GHz (faixa que foi permitido a medição).

Figura 62: Comparação da perda de retorno da antenna de ZnFe_2O_4 .

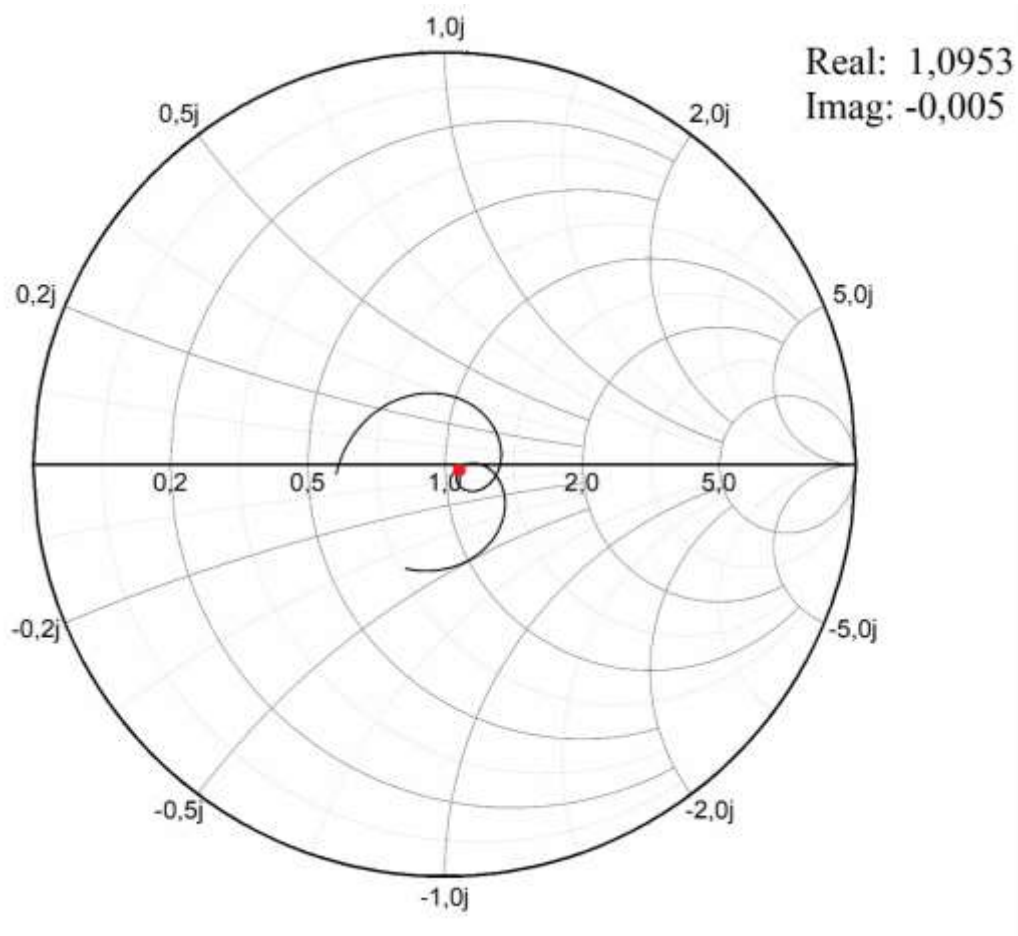


Fonte: autoria própria.

Pela Figura 62, observa-se que a antenna de ZnFe_2O_4 ressoou na frequência de 5,949 GHz (-28,544 dB) com largura de banda de 494,8 MHz (5,6633 GHz a 6,1581 GHz). Novamente o efeito de redução da frequência de ressonância foi verificado na antenna com ferrita de zinco em relação a antenna dielétrica, porém não coincidiu com a frequência da antenna simulada padrão, onde é considerado a permeabilidade magnética, isso provavelmente ocorre devido a utilização de valores aproximados da permeabilidade.

A Figura 63, mostra a carta de Smith da antenna de ZnFe_2O_4 na frequência de ressonância.

Figura 63: Carta de Smith medida da antena ZnFe_2O_4

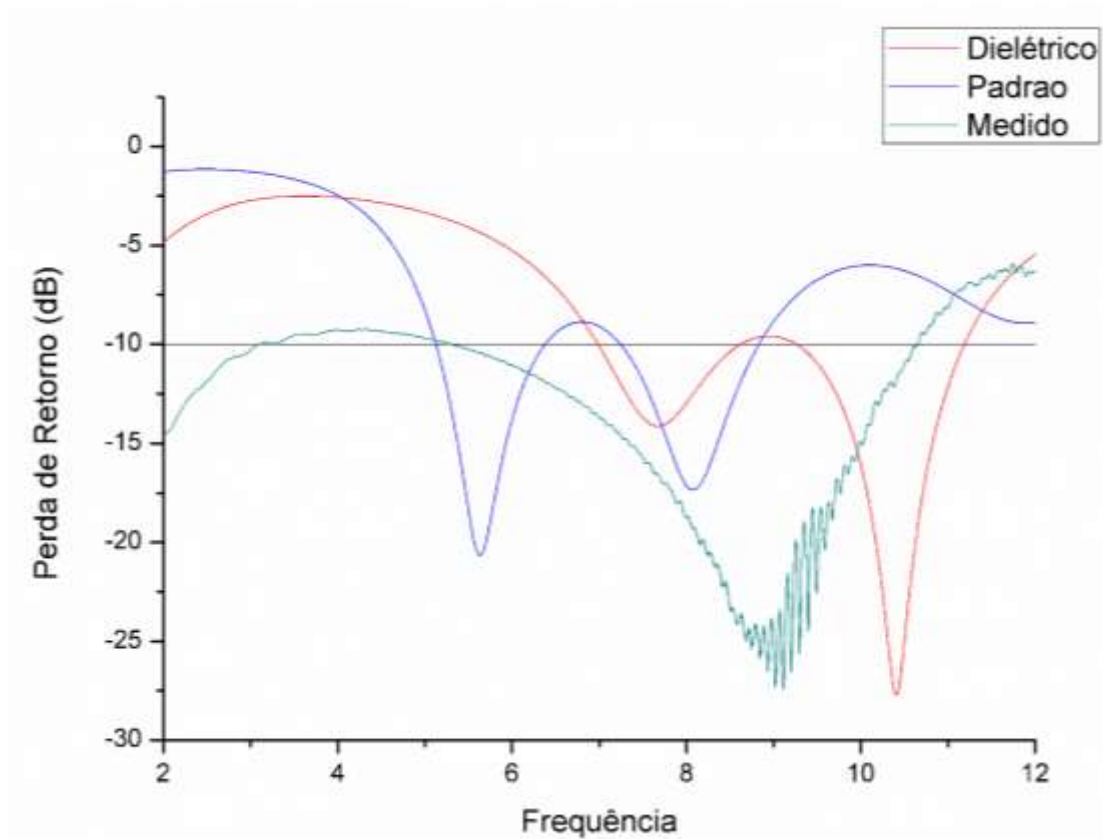


Fonte: autoria própria

Através da Figura 63, pode-se observar que na frequência de ressonância (5,949 GHz) a antena de ZnFe_2O_4 tem uma impedância de entrada de $z=54,765-j0,25\Omega$, considerando o valor real da medição. Este resultado se mostra satisfatório tendo em vista que a parte real está próxima de 50 e a parte imaginária próxima de zero, implicando baixas perdas por reflexão do sinal de entrada.

A seguir, a Figura 64 mostra a comparação da perda de retorno medido e simulado da antena de $\text{Ni}_{0,5}\text{Zn}_{0,5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ na faixa de frequência de 2GHz a 12GHz.

Figura 64: Comparação da perda de retorno da antenna de $\text{Ni}_{0,5}\text{Zn}_{0,5}\text{Fe}_2\text{O}_4$.

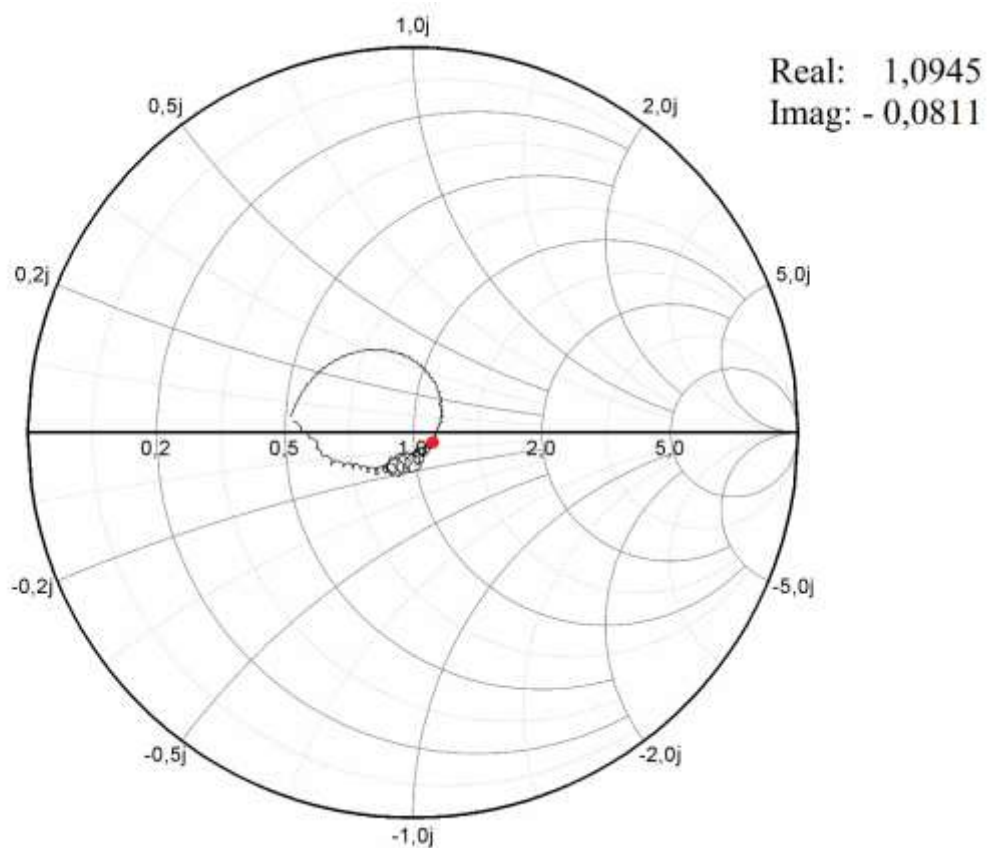


Fonte: autoria própria.

Na Figura 64, observa-se que o gráfico da perda de retorno da antenna de $\text{Ni}_{0,5}\text{Zn}_{0,5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ apresenta ruído na medição, provavelmente pela presença de algum elemento parasita do conector ou pela não fixação adequada do elemento radiador do *patch* no substrato. Contudo, não impossibilitou que fosse verificado que a antenna ressoou abaixo de 10 dB com uma frequência estimada em torno de 8,9 GHz (-25,898 dB) e largura de banda de 5,3359 GHz (5,2634 GHz a 10,5993GHz). Esses valores são estimados devido a presença do ruído dificultar a indicação de um valor mais preciso. Também foi constatado que a utilização do substrato com ferrita Ni-Zn acarretou na diminuição da frequência de ressonância em relação a antenna dielétrica, mesmo fato observado nas antenas anteriores.

A Figura 65 mostra a carta de Smith na frequência de ressonância estimada da antenna de $\text{Ni}_{0,5}\text{Zn}_{0,5}\text{Fe}_2\text{O}_4$.

Figura 65: Carta de Smith medida da antena $\text{Ni}_{0,5}\text{Zn}_{0,5}\text{Fe}_2\text{O}_4$



Fonte: autoria própria

Através da Figura 65, verifica-se que na frequência de ressonância estimada de 8,9 GHz a impedância de entrada corresponde a $z=54,725-j4,055 \Omega$ caracterizando um bom casamento de impedância tendo em vista que a parte real novamente se aproxima do valor de 50 ohms e a imaginária próxima de zero.

A seguir, é apresentado a Tabela 5 com os valores resumidos simulados e medidos das três antenas com suas respectivas frequências de ressonância, larguras de banda e impedância de entrada.

Tabela 5: Valores resumidos simulados e medidos das antenas de microfita

Antena	Simulado				Medido		
	Dielétrico		Padrão				
	Largura		Largura		Largura		
	Freq. (GHz)	de banda (GHz)	Freq. (GHz)	de banda (GHz)	Freq. (GHz)	de banda (GHz)	Impedância (Ω)
NiFe₂O₄	10,71	0,8318	5,722	0,8106	8,704	4,297	1,0529+j0,0170
ZnFe₂O₄	10,357	1,0438	5,022	1,0677	5,949	0,4948	1,0953-j0,005
Ni_{0,5}Zn_{0,5}Fe₂O₄	10,427	1,9494	5,552	1,284	8,9	5,3359	1,0945-j0,0811

Fonte: autoria própria

Por meio da tabela 5, verifica-se de forma objetiva o quanto de redução houve nas frequências de ressonância das antenas de ferrita Ni, Zn e NiZn bem como suas respectivas impedâncias normalizadas.

A Antena NiFe₂O₄ que possuía nas simulações as frequências 10,71 GHz (Dielétrico) e 5,722 GHz (Padrão), no momento da medição obteve-se 8,704 GHz. A ZnFe₂O₄ possuiu nas medições as frequências de 10,357 GHz (Dielétrico) e 5,022 GHz (Padrão) com valor medido de 5,949 GHz. Por fim, na antena de NiZn as frequências simuladas foram 10,427 GHz (Dielétrico) e 5,552 GHz (Padrão) com valor medido de 8,9 GHz.

Em todas as antenas o valor da impedância de entrada foram próximos do valor unitário, significando um bom casamento de impedância das antenas.

7. CONCLUSÕES

No desenvolvimento deste trabalho, foram realizados o projeto e simulações de antenas de microfita com substrato de materiais magnéticos de ferrita (NiFe_2O_4 , ZnFe_2O_4 e $\text{Ni}_{0,5}\text{Zn}_{0,5}\text{Fe}_2\text{O}_4$) com o objetivo de verificar o efeito da permeabilidade magnéticas nas características da antena e a viabilidade da utilização dessas antenas. Os resultados se mostraram satisfatórios em virtude de todas as antenas ressoarem abaixo de 10 dB com uma frequência de ressonância menor do que as antenas com substrato de materiais dielétricos.

A técnica de Sol-Gel, utilizada para produção dos pós de ferrita, mostrou-se eficiente tendo em vista a formação das fases cristalinas das respectivas ferritas comprovadas através dos resultados obtidos no DRX. Outra vantagem dessa técnica se mostra no relativo curto espaço de tempo para produção do pó e o baixo custo de sua produção.

A caracterização das pastilhas de ferrita foram analisadas através do método da sonda coaxial, necessário para obtenção da permissividade elétrica e tangentes perdas. Esses valores foram necessários para viabilizar o dimensionamento do *patch* das antenas. Como não foi possível realizar as medições da permeabilidade magnéticas, pois seria necessário um núcleo toroidal de ferrita para possibilitar tal medição, foi feita uma pesquisa em artigos com o objetivo de obter o valor da permeabilidade que se aproximasse da realidade.

Através dos dados coletados da caracterização das propriedades elétricas e magnéticas foi possível realizar os projetos e simulações das antenas utilizando o *software* Ansys HFSS[®]. As simulações consistiram em simular primeiros as antenas chamadas de dielétrica em que se considerava apenas os efeitos da permissividade elétrica obtidas na etapa de caracterização e a permeabilidade magnética era admitida o valor unitário, em seguida foi realizado as simulações das antenas chamadas de padrão, na qual levava se em consideração os efeitos elétricos e magnéticos do material para que no final fosse realizado uma comparação com a antena medida e observar o comportamento dos parâmetros das antenas.

Todas as antenas tiveram seus parâmetros de perda de retorno e impedância de entrada medidos através de um analisador de redes vetoriais, apresentando resultados

satisfatórios, evidenciando o efeito da redução da frequência de ressonância quando se utiliza materiais magnéticos como substratos de antenas de microfita. Os valores não coincidiram com as antenas simuladas padrão devido a utilização de valores aproximados para permeabilidade magnética, contudo não refutou a ideia que os efeitos magnéticos da ferrita auxiliam na redução da frequência de operação da antena. Todas as antenas foram projetadas para uma frequência de 10GHz, contudo as antenas ressoaram em 8,704 GHz, 5,949 GHz e 8,9 GHz para NiFe_2O_4 , ZnFe_2O_4 e $\text{Ni}_{0,5}\text{Zn}_{0,5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ respectivamente.

Para trabalhos futuros se propõem a fabricação de núcleos toroidais feitos com os pós das ferritas para viabilizar a medição da permeabilidade magnética, possibilitando uma simulação mais precisa dessas antenas. Propõem-se também a produção de variadas concentrações de dopagem de ferrita para observar com mais clareza a influência que cada ferrita causa nos parâmetros das antenas.

REFERÊNCIAS

AGILENT TECHNOLOGIES. 85070E **Dielectric Probe Kit**. Santa Clara: Agilent, 2013.

ALBUQUERQUE, M. R. M. L. et al. **Efeito da Variação da Espessura do Substrato Ferrimagnético em Antenas de Microfita**. In: XXI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TELECOMUNICAÇÕES-SBT, 2004, Belém. Simpósio. Belém: Sbt, 2004. p. 6 - 9.

ALI, M.a. et al. **Structural, morphological and electrical properties of sn-substituted ni-zn ferrites synthesized by double sintering technique**. Journal Of Magnetism And Magnetic Materials, [s.l.], v. 424, p.148-154, fev. 2017. Elsevier BV.

AMORIM, Bruno Ferreira. **Síntese e caracterizações estrutural e -manganês ($co_{1-x}mn_xfe_2o_4$ e $co_{1,2}fe_{1,8-x}mn_xo_4$) magnética das ferritas de cobalto**. 2015. 122 f. Tese (Doutorado) - Curso de Física, Física Teórica e Experimental, Ufrn, Natal, 2015.

ANDERSON, D. L. **s-parameter theory and applications**. Hewlett-Packard Journal. 1967.

ASSIS, Raimison Bezerra de. **Síntese e caracterização de ferrita ni-zn pelo método dos precursores poliméricos calcinada por energia de microondas**. 2013. 116 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Materiais, Ufrn, Natal, 2013.

CALLISTER JÚNIOR, William D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 7. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2008. 1 v.

CUELLAR, C. et al. Measurement method of the complex magnetic permeability of ferrites in high frequency. 2012 **Ieee international instrumentation and measurement technology conference proceedings**, [s.l.], p.986-993, maio 2012. IEEE. <http://dx.doi.org/10.1109/i2mtc.2012.6229697>.

BALANIS, Constantine A. **Antenna theory: Analysis and Design**. 3 ed. New Jersey: John Wiley & Sons. p. 1073. 2005.

BRITO, V. L. O.. **Ferritas ni-zn: breve revisão sobre o processo convencional de fabricação e as propriedades permeabilidade magnética e constante dielétrica**. Cerâmica, [s.l.], v. 52, n. 324, p.221-231, dez. 2006. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0366-69132006000400002>.

BUENO, Alexandre R.; GREGORI, Maria L.; NÓBREGA, Maria C.s.. **Microwave-absorbing properties of ni_{0.50}-xzn_{0.50}-xme₂xfe_{2o4} (me=cu, mn, mg) ferrite-wax composite in x-band frequencies.** Journal Of Magnetism And Magnetic Materials, [s.l.], v. 320, n. 6, p.864-870, mar. 2008. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmmm.2007.09.020>.

CARNEIRO FILHO, R. **Desenvolvimento de substrato cerâmico binbo4 para antenas de microfita de sistemas de comunicações sem fio.** Natal, 2010, 82 p. Tese (Doutorado em Ciências). Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

CARVALHO, Daniele Gomes. **Nanopartículas de ni₁-xznxfe_{2o4} sintetizadas pelo método de sol gel/combustão.** 2012. 84 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Ciência dos Materiais do Instituto Militar de Engenharia, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2012.

COSTA, A. F. et al. **Síntese e caracterização de espinélios à base de ferritas com gelatina como agente direcionador.** Cerâmica, Natal, v. 1, n. 57, p.352-355, jul. 2011.

DAS, N.; CHOWDHURY, S.k.. **Microstrip rectangular resonators on ferrimagnetic substrates.** Electronics Letters, [s.l.], v. 16, n. 21, p.817-818, 1980. Institution of Engineering and Technology (IET).

DEDAVID, Berenice Anina et al. **Microscopia eletrônica de varredura - aplicações e preparação de amotras: Materiais Poliméricos, metálicos e semicondutores.** Porto Alegre: Edipucrs, 2007. 60 p. 60 f.

DESCHAMPS, G. A. **Microstrip microwave antennas.** In: 3rd. USAF SYMPOSIUM ON ANTENNAS, 1953.

DMITRO, Trushakov; SERHIY, Rendzinyak; IVANNA, Vasylychshyn. **Determining of complex magnetic permeability of the ferromagnetic material by complex impedance of inductance coil with ferromagnetic core.** Przegląd Elektrotechniczny, [s.l.], n. 04/2014, p.221-223, 2014. SIGMA-NOT. <http://dx.doi.org/10.12915/pe.2014.04.53>.

FILHO, V. A. A. **Arranjo de log-periódicos compactos em microfita com elementos fractais de koch.** Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFRN. Natal, 2010.

GABAL, M.a.; EL-SHISHTAWY, Reda M.; ANGARI, Y.m. Al. **Structural and magnetic properties of nano-crystalline ni–zn ferrites synthesized using egg-white precursor.** Journal Of Magnetism And Magnetic Materials, [s.l.], v. 324, n. 14, p.2258-2264, jul. 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmmm.2012.02.112>.

GHAVAMI, M. et al. **Ultra wideband: signals and systems in communication engineering.** West Sussex: John Wiley & Sons. p. 278. 2004.

GUERRA, Juan Rafael Filguiera. **Projeto de antena de microfita flexível utilizando de tecido malha a base de fibras naturais e sintéticas.** 2016. 121 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Sistemas de Comunicação e Controle, Cited, Ufersa, Mossoró, 2016.

HAMMERSTAD, E.O. **Equations for microstrip circuit design.** Fifth European Microwave Conference. Hamburg:, p. 268-272. set. 1975.

HECK, A. L. et al. **Síntese do espinélio mgal₂o₄ via. cerâmica,** [s.l.], v. 51, n. 318, p.117-120, jun. 2005. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0366-69132005000200008>.

HOLANDA, Samanta M. de et al. **Microstrip antenna based on knitted fabrics with biodegradable synthetic fibers.** Journal Of Materials Science: Materials in Electronics, [s.l.], v. 28, n. 20, p.15118-15126, 7 jul. 2017. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/s10854-017-7387-3>.

HUANG, Yi; BOYLE, Kevin. **Antennas: from theory to practice.** New Delhi: Wiley, 2008. 357 p.

IEEE. **Ieee standard definitions of terms for antennas.** p. 32 april,2013.

KARAKAŞ, Zeynep Karcıoğlu et al. **The effects of heat treatment on the synthesis of nickel ferrite (nife₂o₄) nanoparticles using the microwave assisted combustion method.** Journal Of Magnetism And Magnetic Materials, [s.l.], v. 374, p.298-306, jan. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmmm.2014.08.045>.

KOOTI, M.; SEDEH, A. Naghdi. **Synthesis and characterization of nife₂o₄ magnetic nanoparticles by combustion method.** Journal Of Materials Science & Technology, [s.l.], v. 29, n. 1, p.34-38, jan. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmst.2012.11.016>.

JIANG, Nan-nan et al. **Influence of zinc concentration on structure, complex permittivity and permeability of ni–zn ferrites at high frequency.** Journal Of Magnetism And Magnetic Materials, [s.l.], v. 401, p.370-377, mar. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmmm.2015.10.003>.

LEE, Kai-fong. **Microstrip patch - basic properties and some recent advances.** Journal Of Atmospheric And Terrestrial Physics, Toledo, v. 51, n. 9, p.811-818, 30 abr. 1989.

LESNIKOWSKI, J. **Dielectric permittivity measurement methods of textile substrate of textile transmission lines.** Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review), v. 88, n. , p. 148–151, 2012.

LIMA, Álvaro Niedersberg Correia. **Obtenção e caracterização de espinélio mgal_2o_4 nanoestruturado através de síntese por combustão em solução.** 2007. 1 v. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Minas, Ppgem, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

LIU, Ruirui et al. **Solvothermal synthesis of size-tunable znfe_2o_4 colloidal nanocrystal assemblies and their electrocatalytic activity towards hydrogen peroxide.** Journal Of Magnetism And Magnetic Materials, [s.l.], v. 424, p.155-160, fev. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmmm.2016.10.038>.

MAIA, Anamaria Sena. **Estudo do comportamento dosparâmetros de antenas de microfita utilizando diferentes configurações de arranjos de estruturas ebg/pbg.** 2016. 169 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Sistemas de Comunicação e Controle, Cited, Ufersa, Mossoró, 2016.

MEDEIROS, T. E. L. **Antenas de microfita sobre substrato dielétrico organizado de forma quase periódica.** Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Comunicação e Automação da UFERSA, Mossoró, 2013.

OLIVEIRA, Elder Eldervitch Carneiro de. **Antenas de microfita com patch quase-fractal para aplicações em redes wpan/wlan.** 2008. 125 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Centro de Tecnologia, Ufrn, Natal, 2008.

OLIVEIRA, Elder Eldervitch Carneiro de. **Desenvolvimento de antenas de microfita e antenas dra broadband/ultra wideband para sistemas de comunicação sem fio**

utilizando pós cerâmicos nanoestruturados. 2011. 236 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Elétrica e de Computação, Ufrn, Natal, 2011.

PINHEIRO, Antônia Veruska Benevides. **Exchange bias e medidas de hipertermia em estruturas tipo core/shell $\text{cofe}_{2\text{o}4}@\text{cofe}_2/\text{ag}$.** 2015. 1 v. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Física, Física, Uern, Mossoró, 2015.

POZAR, David M. **Microwave engineering.** 4 ed. United States of America: John Wiley & Sons. p. 756. 2012.

RIVERA-ALBINO, Alix; BALANIS, Constantine A.. **Gain enhancement in microstrip patch antennas using hybrid substrates.** Ieee Antennas And Wireless Propagation Letters, New York, v. 12, p.476-479, nov. 2013.

SAFARI, A.; GHEISARI, Kh.; FARBOD, M.. **Characterization of ni ferrites powders prepared by plasma arc discharge process.** Journal Of Magnetism And Magnetic Materials, [s.l.], v. 421, p.44-51, jan. 2016. Elsevier BV.

SHANMUGAVANI, A. et al. **Size dependent electrical and magnetic properties of $\text{znfe}_{2\text{o}4}$ nanoparticles synthesized by the combustion method: comparison between aspartic acid and glycine as fuels.** Journal Of Magnetism And Magnetic Materials, [s.l.], v. 354, p.363-371, mar. 2014. Elsevier BV.

SHI, Zhenhua et al. **Magnetic resonance of the $\text{nife}_{2\text{o}4}$ nanoparticles in the gigahertz range.** nanoscale research letters, [s.l.], v. 8, n. 1, p.404-409, 2013. Springer Nature.

SHINDE, T.j.; GADKARI, A.b.; VASAMBEKAR, P.n.. **Magnetic properties and cation distribution study of nanocrystalline ni-zn ferrites.** Journal Of Magnetism And Magnetic Materials, [s.l.], v. 333, p.152-155, maio 2013. Elsevier BV.

SILVA, Isaac B. T. da et al. **Design of microstrip patch antenna with complementary split ring resonator device for wideband systems application.** Microwave And Optical Technology Letters, [s.l.], v. 57, n. 6, p.1326-1330, 27 mar. 2015. Wiley-Blackwell. <http://dx.doi.org/10.1002/mop.29081>.

SOARES JÚNIOR, Francisco Holanda. **Efeitos de superfície nas propriedades magnéticas do nanocompósito de $\text{cofe}_{2\text{o}4}/\text{ag}$.** 2012. 89 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Física, Uern, Mossoró, 2012.

TEBER, Ahmet et al. **Manganese and zinc spinel ferrites blended with multi-walled carbon nanotubes as microwave absorbing materials.** Aerospace, [s.l.], v. 4, n. 1, p.2-7, 14 jan. 2017. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/aerospace4010002>.

VASCONCELOS, Cristhianne de Fátima Linhares de. **Desenvolvimento de antenas de microfita com patch em anel utilizando materiais ferrimagnéticos e metamateriais.** 2010. 116 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Elétrica, UFRN, Natal, 2010.

ANEXO I

Neste anexo é apresentado os cálculos da quantidade de reagentes para sintetização das ferritas Ni-Zn através da técnica Sol-Gel. Foram propostos 3 experimentos variando a composição de Ni e Zn mostrados da tabela 6.

Tabela 6: Ferritas produzidas

Experimento	Composição
1	NiFe ₂ O ₄
2	Ni _{0,5} Zn _{0,5} Fe ₂ O ₄
3	ZnFe ₂ O ₄

Fonte: autoria própria

A estequiometria realizada para produção das ferritas mostrada na tabela 6 foi separada em duas etapas:

- 1) Calcular as proporções de massa necessárias de acordo com elementos constituintes da Ferrita;
- 2) Calcular as quantidades dos reagentes utilizados no processo Sol-Gel.

Como exemplo, abaixo encontra-se descrito o procedimento utilizado para calcular as quantidades dos reagentes para o experimento 1, NiFe₂O₄. Os cálculos para os demais experimentos são análogos a esse, por isso serão omitidos.

Experimento – NiFe₂O₄

Etapa 1

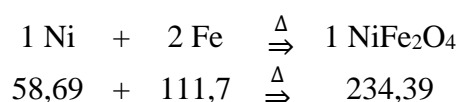
Sabendo que as massas atômicas dos elementos constituintes são:

Ni=58,69

Fe=55,85

O=16,00

Para produzir 1 mol de NiFe₂O₄ tem-se:



Realizando algumas razões e proporções para obter a quantidade de reagentes necessária tem-se:

$$\begin{array}{rcl} 58,69 & \rightarrow & 234,39 \\ X_{\text{Ni}} & \leftarrow & 1\text{g} \end{array} \quad \text{e} \quad \begin{array}{rcl} 111,7 & \rightarrow & 234,39 \\ X_{\text{Fe}} & \leftarrow & 1\text{g} \end{array}$$

$$\boxed{X_{\text{Ni}} = 0,25\text{g}}$$

$$\boxed{X_{\text{Fe}} = 0,47\text{g}}$$

Portanto, para produzir 1g de NiFe₂O₄ são necessários 0,25g de Ni e 0,47g de Fe.

Etapa 2

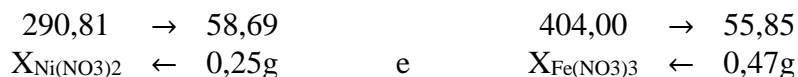
Os reagentes utilizados no processo Sol-Gel e seus respectivos pesos moleculares encontram-se dispostos na tabela 7.

Tabela 7: Reagentes utilizados na técnica Sol-Gel

Reagente	Peso Molecular (g/mol)
Nitrato de Níquel [Ni(NO ₃) ₂]	290,81
Nitrato de Zinco [Zn(NO ₃) ₂]	297,49
Nitrato de Ferro [Fe(NO ₃) ₃]	404,00
Ácido Cítrico [C ₆ H ₈ O ₇]	210,14
Etilenoglicol [C ₂ H ₆ O ₂]	62,07

Fonte: autoria própria

Para saber quantas gramas dos nitratos são necessários, faz-se uma razão-proporção entre o peso molecular dos nitratos, a massa atômica do elemento isolado e sua respectiva massa requerida, logo:

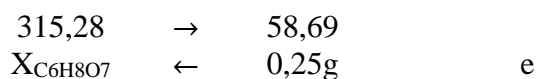


$$X_{\text{Ni}(\text{NO}_3)_2} = 1,24\text{g}$$

$$X_{\text{Fe}(\text{NO}_3)_3} = 3,45\text{g}$$

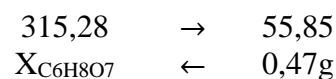
Para calcular a quantidade de ácido cítrico necessária, considera-se uma proporção de 1,5 com o intuito de tornar o meio ácido suficiente para que ocorra a diluição dos nitratos na solução aquosa. Dessa forma, o peso molecular do ácido cítrico utilizado será 315,28 g/mol. Assim, para cada elemento tem-se:

Para o nitrato de níquel:



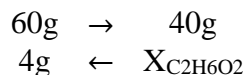
$$X_{\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7} = 1,34\text{g}$$

Para o nitrato de ferro:



$$X_{\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7} = 2,65\text{g}$$

Somando os resultados encontrados, tem-se o valor total de ácido cítrico necessário para produção de 1g de NiFe_2O_4 é igual a 4g. A proporção de ácido cítrico e etilenoglicol é de 60:40, Logo:



$$X_{\text{C}_2\text{H}_6\text{O}_2} = 2,67\text{g}$$

Como o etilenoglicol é um reagente líquido, é necessário fazer a conversão de g para mL. Para tanto, basta efetuar a divisão da massa encontrada pela densidade do reagente ($1,11 \text{ g/cm}^3$), portanto:

$$X_{\text{C}_2\text{H}_6\text{O}_2} = 2,67 / 1,11 = 2,42\text{ml}$$

Por fim, para produzir 1g de NiFe_2O_4 são necessários:

3,45g de Nitrato de Ferro
1,24g de Nitrato de Níquel
4,00g de Ácido Cítrico
2,42ml de Etilenoglicol

Para a obter 30g da Ferrita de Níquel basta multiplicar essas quantidades por 30. O raciocínio é o mesmo para as ferritas $\text{Ni}_{0,5}\text{Zn}_{0,5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ e ZnFe_2O_4 , prestando atenção nos nitratos envolvidos na síntese.