



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA
MESTRADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

PEDRO BRUNO NOGUEIRA DA SILVA

DESENVOLVIMENTO DE FERRITA DE COBALTO (CoFe_2O_4) PARA APLICAÇÕES
EM DISPOSITIVOS DE MICRO-ONDAS

MOSSORÓ

2020

PEDRO BRUNO NOGUEIRA DA SILVA

DESENVOLVIMENTO DE FERRITA DE COBALTO (CoFe_2O_4) PARA APLICAÇÕES
EM DISPOSITIVOS DE MICRO-ONDAS

Defesa de dissertação de mestrado apresentado ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Linha de Pesquisa: Telecomunicações e Eletromagnetismo aplicado

Orientador: Idalmir de Souza Queiroz Júnior

Co-orientador: Humberto Dionísio de Andrade

MOSSORÓ

2020

© 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 nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-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.

SS586 Silva, Pedro Bruno Nogueira.
d DESENVOLVIMENTO DE FERRITA DE COBALTO
(CoFe₂O₄) PARA APLICAÇÕES EM DISPOSITIVOS DE MICRO-
ONDAS / Pedro Bruno Nogueira Silva. - 2020.
103 f. : il.

Orientador: Idalmir de Souza Queiroz Junior.
Coorientador: Humberto Dionísio de Andrade.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Programa de Pós-graduação em
Engenharia Elétrica, 2020.

1. Ferrita de Cobalto. 2. Antena de Ressonador
Dieletrico. 3. Antena de Microfita. 4. Método Sol-
Gel. I. Queiroz Junior, Idalmir de Souza ,
orient. II. Andrade, Humberto Dionísio de, 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.

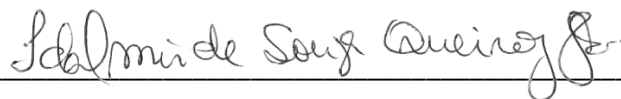
PEDRO BRUNO NOGUEIRA DA SILVA

DESENVOLVIMENTO DE FERRITA DE COBALTO (CoFe_2O_4) PARA APLICAÇÕES
EM DISPOSITIVOS DE MICRO-ONDAS

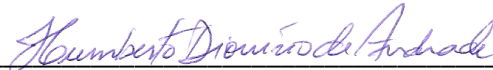
Defesa de dissertação de mestrado apresentado ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Linha de Pesquisa: Telecomunicações e Eletromagnetismo aplicado

Defendido em: 30/12/2020



Prof. Dr. Idalmir de Souza Queiroz Júnior - Presidente e Orientador (UFERSA - Videoconferência)



Prof. Dr. Humberto Dionísio de Andrade – Co-orientador (UFERSA - Videoconferência)



Prof. Dr. Isaac Barros Tavares da Silva – Membro interno (UFERSA - Videoconferência)



Prof. Dr. Rodolfo Bezerra da Silva – Membro externo (UFRN - Videoconferência)

MOSSORÓ

2020

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais Eva Vilma Paula Nogueira e Calebe Pereira da Silva pelo apoio durante toda a minha vida.

Aos meus colegas Anderson, Júnior, Lucas, Raquel, Luís, Bruno, André, Marcelo, Daniel, Mateus, Aline, Sanderson, Gabriel, Thalita e Pedro Paulo por me ajudar com os melhores momentos de diversão que eu poderia ter tido.

Aos meus orientadores Idalmir Queiros de Souza Júnior e Humberto Dionísio de Andrade pela paciência, calma, contribuições e pelos ensinamentos, além de todos os outros professores que tive em toda minha vida acadêmica.

Agradeço aos membros do Laboratório de Telecomunicações e Ciência e Engenharia de Materiais (LOCEM) por me ajudar com as medidas deste trabalho e pelos ensinamentos que me passaram.

Agradeço à banca pela disponibilidade para minha avaliação, além de me mostrar conhecimentos relacionados à pesquisa.

Sou grato ao todos que me ajudaram e me apoiaram em todas as etapas da minha vida.

RESUMO

O constante avanço nas tecnologias de comunicação demanda capacidades maiores em seus sistemas além de conforto. Pesquisas relacionadas a melhorias em dispositivos de comunicação são amplamente realizadas por causa dessa demanda. Essas pesquisas podem ser realizadas na forma estrutural dos dispositivos ou simplesmente na composição material destes. Este trabalho busca avaliar a viabilidade do material Ferrita de Cobalto (CoFe_2O_4) para composição de um ressoador em uma antena de ressoador dielétrico (DRA), ou antena de ressoador ferrimagnético (FRA), e para composição de um substrato de antena de microfita. O material proposto foi produzido pelo método Sol-Gel. Foi realizada a caracterização eletromagnética do material, assim como simulações no *software ANSYS HFSS®* e medições de seus parâmetros de reflexão, com auxílio de Analisadores de Rede Vetoriais. As antenas construídas apresentaram resultados satisfatórios, principalmente na aplicação em DRA, com uma perda de retorno de -48,52 dB e uma impedância de entrada de $50,134 - j 0,055 \Omega$ na frequência de ressonância de 7,31 GHz.

Palavras chave: Ferrita de Cobalto, Antena de Ressorador Dielétrico, Antena de Microfita, Método Sol-Gel.

ABSTRACT

The constant progress in communication technologies demands greater capabilities in your systems in addition to comfort. Some researches related to improvements in communication devices is largely realized because of this demand. These researches can be made in the structural form of the devices or simply in their material composition. This work aims to evaluate the feasibility of the material Cobalt Ferrite (CoFe_2O_4) for composition of a resonator in a dielectric resonator antenna (DRA), or ferrimagnetic resonator antenna (FRA), and for the composition of a substrate in microstrip antenna. The proposed material was produced by the Sol-Gel method. The electromagnetic characterization of the material was executed, as well as simulations in the ANSYS HFSS® software and measurements of its reflection parameters by using a Vector Network Analyzer. The built-in antennas showed satisfactory results, mainly in DRA application, with a return loss of -48.52 dB and an input impedance of $50.134 - j 0.055 \Omega$ at the resonance frequency of 7.31 GHz.

Keywords: Cobalt Ferrite, Dielectric Resonator Antenna, Microstrip Antenna, Sol-Gel Method.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Circuito equivalente de um sistema de emissão de ondas.	15
Figura 2 - Exemplos de diagramas de radiação tridimensionais.	17
Figura 3 - Cortes para diagrama de radiação bidimensional.	18
Figura 4 - Representação gráfica de um radiano e um esterradiano.	19
Figura 5 - Gráfico de perda de retorno.	20
Figura 6 - Circuito Equivalente de Thevenin.	22
Figura 7 - Circuito de Linha de transmissão Z_0 e carga Z_L	24
Figura 8 - Carta de Smith.	25
Figura 9 - Antena de Microfita.	26
Figura 10 - Exemplos de possíveis patches de microfita.	27
Figura 11 - Plano de terra truncado com visão frontal em (a) e posterior em (b).	28
Figura 12 - Alimentação por Linha de Microfita.	29
Figura 13 - Alimentação por ponta de prova coaxial.	30
Figura 14 - Alimentação por acoplamento por abertura.	31
Figura 15 - Alimentação por acoplamento por proximidade.	31
Figura 16 - Consideração de um patch retangular de microfita para o modelo da cavidade.	33
Figura 17 - Distribuição de corrente nas superfícies do patch e do plano de terra.	33
Figura 18 - Linha de microfita e linhas de campo elétrico.	36
Figura 19 - Comprimento real e comprimento elétrico de um patch retangular.	37
Figura 20 - Representação da técnica de inset feed.	39
Figura 21 – Formatos diversos de DRA.	42
Figura 22 - DRA semiesférico.	42
Figura 23 – DRA cilíndrico.	43
Figura 24 – DRA retangular.	43
Figura 25 - Métodos de alimentação de DRA. (a) cabo coaxial, (b) abertura e (c) linha de microfita	44
Figura 26 – Representação da estrutura espinélio.	47
Figura 27 - Relação entre o tamanho das partículas e a temperatura de sinterização.	50
Figura 28 - Etapas do processo Sol-Gel.	53

Figura 29 - Formação da suspensão coloidal e reação dos íons metálicos.....	54
Figura 30 - Material obtido após secagem.	55
Figura 31 – Produto obtido após a calcinação da ferrita de cobalto (CoFe_2O_4).....	56
Figura 32 – Pó de ferrita de cobalto (CoFe_2O_4) obtido com a maceração do material calcinado.	59
Figura 33 – Material compactado em forma cilíndrica.	60
Figura 34 – Material compactado em formato toroidal.	61
Figura 35 – Matrizes utilizadas para prensagem das pastilhas cilíndricas.	62
Figura 36 – Matrizes utilizadas para prensagem das pastilhas toroidais.	62
Figura 37 - Medição das massas de Ferrita de Cobalto para prensagem das pastilhas cilíndricas (a) e toroidais (b).....	63
Figura 38 - Prensagem das peças na prensa hidráulica (a) com 2 toneladas aplicadas (b).	64
Figura 39 - Coalescência e densificação do cristalito no processo de sinterização.....	65
Figura 40 – Representação da difração de raios X.	66
Figura 41 – Estrutura de um difratômetro de raios X.....	67
Figura 42 – Difratoograma medido da ferrita de cobalto (CoFe_2O_4).	68
Figura 43 – Microscopia Eletrônica por Varredura da ferrita de cobalto (CoFe_2O_4).....	69
Figura 44 – Estrutura de medição do método Hakki Coleman.....	70
Figura 45 – Estrutura utilizada para medição de permeabilidade magnética.	72
Figura 46 - Temperatura do forno em função do tempo no aquecimento do processo de sinterização.	73
Figura 47 - Produto resultado da sinterização.	74
Figura 48 - Difratoograma da Ferrita de Cobalto.	77
Figura 49 - Microscopia Eletrônica por varredura de amostras de Ferrita de Cobalto (CoFe_2O_4)	78
Figura 50 - Analisador de Impedância Agilent E4991A.....	78
Figura 51 - Medida de permeabilidade magnética nos toroides.....	79
Figura 52 - Medição de μ_r nos toroides.	79
Figura 53 - Tangente de perdas magnética medida nos toroides.....	80
Figura 54 - Estrutura de medição Hakki Coleman.	81
Figura 55 - Estrutura de medição da antena DRA.....	83
Figura 56 - Perda de retorno das antenas DRA medidas.....	84

Figura 57 - Carta de Smith medida para as duas peças de Ferrita.....	85
Figura 58 - Perda de retorno simulada da antena DRA.....	86
Figura 59- Diagrama de radiação bidimensional simulado da antena DRA, com $\varphi= 0^\circ$ (vermelho) e $\varphi= 90$ graus (roxo)	87
Figura 60 - Diagrama de radiação tridimensional simulado da antena DRA.....	87
Figura 61 - Perda de retorno simulada para a antena de microfita sobre substrato de Ferrita de Cobalto (CoFe_2O_4).....	89
Figura 62 - Diagrama de radiação bidimensional simulado da antena de microfita, com $\varphi= 0^\circ$ (vermelho) e $\varphi= 90$ graus (roxo)	90
Figura 63 - Diagrama de radiação tridimensional da antena de microfita.....	90
Figura 64 - Antena de micro fita construída (a) e a medição de sua reflexão no Analisador de Redes Vetorial (b).....	91
Figura 65 - Perda de retorno medida da antena de microfita.....	92
Figura 66 - Carta de smith medida da antena de microfita construída.....	93

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação de antenas com base na largura de banda.	21
Tabela 2 – Massa Atômica dos Elementos que compõem os reagentes.....	57
Tabela 3 – Massa atômica dos reagentes e da Ferrita de Cobalto	57
Tabela 4 – Quantidade necessária de reagentes para produzir 1g de Ferrita de Cobalto.	58
Tabela 5 - Dimensões do cilindro 1.....	74
Tabela 6 - Dimensões do cilindro 2.....	75
Tabela 7 - Dimensões do toroide 1.....	75
Tabela 8 - Dimensões do toroide 2.....	75
Tabela 9 - Dimensões do toroide 3.....	76
Tabela 10 - Massas das amostras produzidas.	76
Tabela 11 - Valores de S21 medidos no método Hakki Coleman no cilindro 1.	81
Tabela 12- Valores de S21 medidos no método Hakki Coleman no cilindro 2.	82
Tabela 13 - Valores de permissividade relativa e tangente de perdas pelo método Hakki Coleman.....	82
Tabela 14 - Dimensões da base de alimentação coaxial utilizada.	83
Tabela 15 - Dados de reflexão medidos na antena DRA.....	84
Tabela 16 - Dados de reflexão simulados na antena DRA.	86
Tabela 17 - Dimensões da antena de microfita projetada.....	88
Tabela 18 - Dados de reflexão simulados para a antena de microfita.	89
Tabela 19 - Dados de reflexão medidos na antena de microfita.....	92

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 OBJETIVO GERAL.....	14
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
2 ANTENAS	15
2.1 PARÂMETROS	16
2.1.1 Diagrama de Radiação	16
2.1.2 Diretividade	18
2.1.3 Ganho	19
2.1.4 Frequência de Ressonância e Largura de Banda	20
2.1.5 Impedância e Carta de Smith	22
3 ANTENAS DE MICROFITA	26
3.1 TÉCNICAS DE ALIMENTAÇÃO	29
3.2 MÉTODOS DE ANÁLISE E PROJETO	32
3.2.1 Modelo da Cavidade	32
3.2.2 Modelo da Linha de Transmissão	36
4 ANTENAS DE RESSOADOR DIELETRICO	41
4.1 MODELAGEM DA DRA	45
5 FERRITAS	47
5.1 TÉCNICAS DE FABRICAÇÃO	49
5.2 FERRITA DE COBALTO	52
6 MATERIAIS E MÉTODOS	53
6.1 FABRICAÇÃO DA FERRITA	53
6.2 ESTEQUIOMETRIA	56
6.3 METALURGIA DO PÓ.....	59
6.4 CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL	65
6.4.1 Difração por Raios X (DRX)	66
6.4.2 Microscopia Eletrônica por Varredura (MEV)	68
6.4.3 Hakki-Coleman	69
6.4.4 Método da indutância	71
7 RESULTADOS	73
7.1 FABRICAÇÃO DAS PASTILHAS	73

7.2 CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL	76
7.2.1 Difração de Raios X.....	76
7.2.2 Microscopia Eletrônica por Varredura.....	77
7.2.3 Permeabilidade Magnética	78
7.2.4 Permissividade Elétrica.....	81
7.3 ANTENAS	82
7.3.1 Antena de Ressonador Ferrimagnético (FRA).....	82
7.3.2 Antena de Microfita.....	88
8 CONCLUSÃO.....	94
REFERÊNCIAS	95

1 INTRODUÇÃO

A tecnologia de comunicações segue uma crescente cada vez maior, quando se trata de capacidade de transmissão de informações ou portabilidade. Este avanço impulsiona uma demanda por melhoras nos dispositivos de telecomunicação. Precisa-se de dispositivos com dimensões menores para questões de portabilidade, mas também equipamentos que tenham uma capacidade maior de transmissão de dados, armazenamento de informações e velocidade no processamento dessas informações.

Em detrimento dessa demanda, as antenas são dispositivos diretamente ligados a esse progresso. Busca-se antenas cada vez com capacidades maiores de transmissão e recepção de dados, desempenho e versatilidade. Uma forma de atender à necessidade mencionada é a pesquisa de materiais para composição das antenas, com base em suas características eletromagnéticas. Conforme Oliveira (2008), materiais que apresentam permissividade elétrica mais elevada tendem a diminuir as dimensões das antenas.

A utilização de materiais magnéticos, portanto, promove uma redução ainda maior do dispositivo ressoante, por possuir o valor de permeabilidade magnética atuando em conjunto com a permissividade elétrica. (DAS; CHOWDHURY, 1980).

As ferritas são materiais capazes de ser utilizados em antenas, pois são cerâmicos dielétricos com características magnéticas. Como afirma Silva (2019), as ferritas são amplamente pesquisadas para aplicações em Antenas de Ressonadores Dielétricos (DRA), por serem materiais versáteis em características eletromagnéticas e em métodos de produção. Esses métodos de produção podem ser observados em Fonseca et al (2017) com a produção de Ferritas de Cobalto e Zinco pelo método da combustão ou Gul e Maqsood (2007) que produziram Ferrita de Cobalto pela técnica Sol-Gel.

A proposta deste trabalho é a fabricação do material ferrimagnético para atuação em DRAs e em antenas de microfita. A ferrita será produzida pelo método Sol-Gel e comporá o ressonador dielétrico da antena DRA e o substrato da antena de microfita. A ferrita utilizada nesta pesquisa é a Ferrita de Cobalto (FeCo_2O_4).

1.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste trabalho é produzir o material proposto Ferrita de Cobalto e analisar sua viabilidade em antenas de microfita e antenas de ressoador dielétrico.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

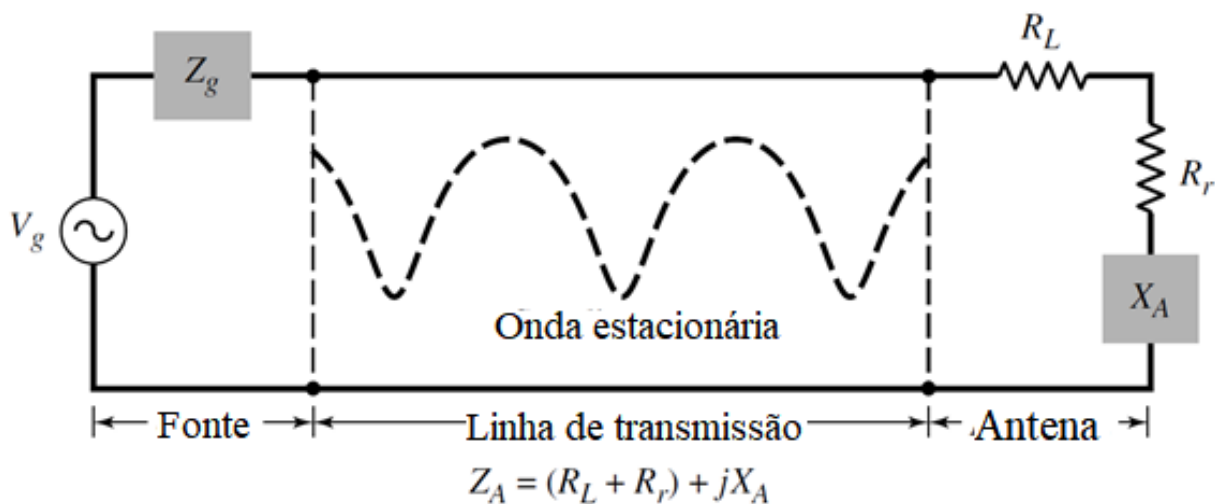
Para alcançar o objetivo geral do trabalho serão realizadas atividades como:

- Estudar conceitos de antenas de microfita e antenas de ressoador dielétrico;
- Realizar o estudo sobre o método Sol-Gel e metalurgia do pó;
- Aprender sobre características eletromagnéticas da Ferrita de Cobalto;
- Produzir a Ferrita de Cobalto pelo método Sol-Gel;
- Executar a caracterização eletromagnética do material produzido;
- Projetar, simular e medir parâmetros de antenas de microfita e antenas de ressoador dielétrico produzidas a partir de Ferrita de Cobalto.

2 ANTENAS

O crescente avanço em comunicação sem fio tornou a antena um equipamento indispensável. Configura-se como antena o dispositivo geralmente metálico responsável pela radiação e recebimento de ondas de rádio. Uma antena também pode ser considerada como a estrutura intermediária entre um dispositivo de guiamento de onda e o espaço livre. O circuito equivalente de Thévenin de uma antena é mostrado na Figura 1, com a representação de um gerador ideal, uma linha de transmissão e a impedância da antena.

Figura 1 - Circuito equivalente de um sistema de emissão de ondas.



Fonte: Adaptado de Balanis, 2005.

A resistência R_L na Figura 1 refere-se às perdas por condução associadas à estrutura da antena enquanto R_r representa a resistência de radiação, utilizada para representar a radiação da antena. Já a reatância X_A diz respeito à parte imaginária da impedância associada à radiação da antena (BALANIS, 2005).

2.1 PARÂMETROS DE ANTENAS

O desempenho de uma antena é medido por meio de parâmetros relacionados às suas especificações. O projeto da antena baseia-se em alguns desses parâmetros, como:

- Diagrama de Radiação;
- Diretividade;
- Ganho;
- Frequência de Ressonância;
- Largura de Banda;
- Impedância.

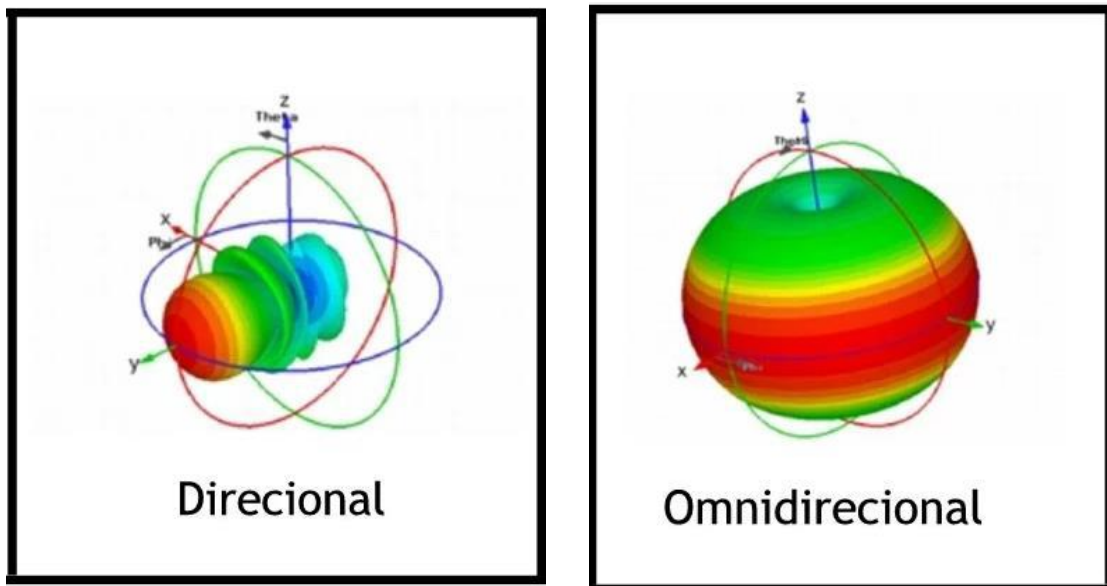
2.1.1 Diagrama de Radiação

O diagrama de radiação é a representação gráfica das propriedades de radiação de uma antena em função de coordenadas espaciais determinadas na região de campo distante. Conforme Balanis (2005), as propriedades mostradas no diagrama de radiação são as representações bidimensionais ou tridimensionais da amplitude da energia radiada na região de campos distantes em relação a uma posição em torno da antena.

Em geral, o diagrama de radiação representa a amplitude do campo magnético ou do campo elétrico ou a potência radiada em função dos ângulos φ e θ em coordenadas esféricas (HOLANDA, 2016). Pode-se classificar os diagramas de radiação de acordo com seu comportamento. A classificação pode ser feita em diagramas isotrópicos, omnidirecionais e diretivos.

Diagramas isotrópicos referem-se a antenas hipotéticas sem perdas que apresentam radiação igual para todas as direções. Por outro lado, um diagrama diretivo representa a capacidade de radiar e receber ondas mais efetivamente em alguma direção. Por último, um diagrama omnidirecional apresenta radiação de forma uniforme ao longo de um plano. A Figura 2 apresenta um exemplo de diagrama diretivo e um exemplo de diagrama omnidirecional.

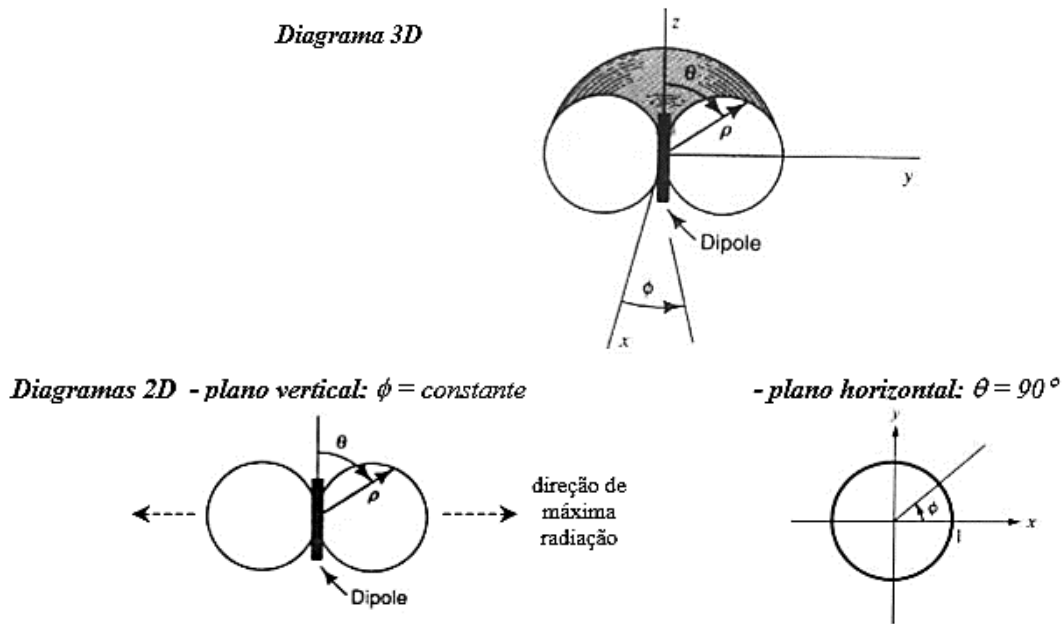
Figura 2 - Exemplos de diagramas de radiação tridimensionais.



Fonte: Martín, 2005.

Outra representação possível do diagrama de radiação é a figura bidimensional. Esta figura é gerada por meio de cortes em planos específicos do diagrama e sua amplitude é representada em coordenadas retangulares. Os planos de corte mais comumente empregados são os planos verticais (com $\varphi = 0^\circ$ ou $\varphi = 90^\circ$) ou o plano horizontal (com $\theta = 90^\circ$), apresentados na Figura 3.

Figura 3 - Cortes para diagrama de radiação bidimensional.



Fonte: Holanda apud Legg, 2016.

2.1.2 Diretividade

A definição de diretividade, segundo a *IEEE Standard Definitions of Terms for Antennas* é a razão entre a intensidade de radiação em uma direção U e a intensidade de radiação média em todas as direções U_0 , sendo esta última igual à potência total radiada pela antena P_{rad} dividido por 4π . A Equação 1 demonstra matematicamente a diretividade de uma antena.

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

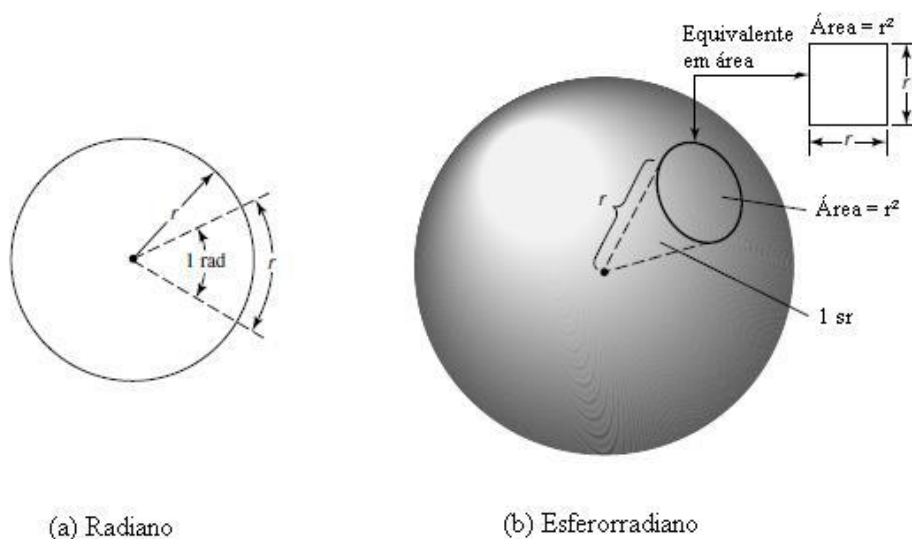
Por sua vez, a intensidade de radiação U em uma determinada direção é dada pela potência radiada pela antena em uma unidade de ângulo sólido. Para calcular a

intensidade de radiação na região de campos distantes, multiplica-se a densidade de radiação na unidade de ângulo sólido W_{rad} pelo quadrado da distância r , como mostra a Equação 2.

$$U = r^2 \times W_{rad} \quad (2)$$

O ângulo sólido é a medida angular espacial, medida em esterradianos (sr), assemelha-se à medida de ângulo plano, que tem sua medida em radianos (rad). No entanto, um radiano representa a medida de um ângulo em um círculo de raio r que forme um arco de comprimento também r , enquanto que um esterradiano representa a medida de um ângulo sólido em uma esfera de raio r que forme em sua superfície uma área circular equivalente a um quadrado de raio r .

Figura 4 - Representação gráfica de um radiano e um esterradiano.



Fonte: Adaptado de Balanis, 2005

2.1.3 Ganho

O ganho de uma antena é uma medida relacionada à diretividade, porém também leva em consideração a eficiência do dispositivo. Segundo Balanis (2005), o

ganho de uma antena em uma direção é definido como a razão entre a intensidade de radiação em uma direção $U(\theta, \varphi)$ e a intensidade de radiação que seria obtida se a antena possuísse um diagrama isotrópico P_{in} .

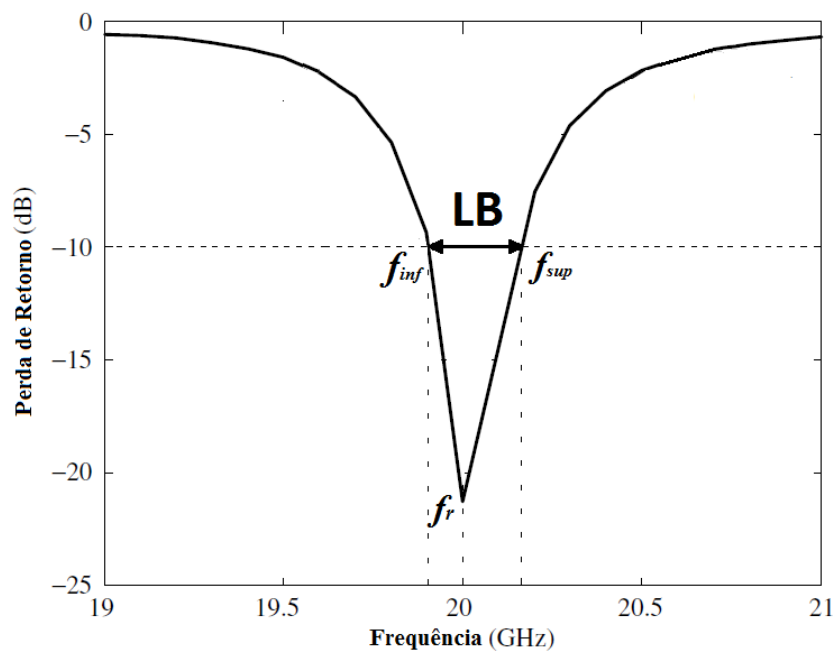
Ainda, a intensidade de radiação de uma antena radiada isotropicamente é igual à potência total de entrada da antena dividido por 4π . Assim, o ganho de uma antena em uma dada direção pode ser calculado pela Equação 3.

$$G = 4\pi \frac{\text{Intensidade de Radiação}}{\text{Potência total de entrada}} = 4\pi \frac{U(\theta, \varphi)}{P_{in}} \quad (3)$$

2.1.4 Frequência de Ressonância e Largura de Banda

Conforme Almeida Filho (2010), o parâmetro de largura de banda de uma antena define-se como a faixa de frequências de operação do dispositivo em torno da frequência central de operação. A representação da faixa de operação de uma antena pode ser observada pelo diagrama de perda de retorno. A Figura 5 apresenta um exemplo de diagrama de perda de retorno.

Figura 5 - Gráfico de perda de retorno.



Fonte: Souza, 2015.

Por meio da Figura pode-se notar que a largura de banda (BW) representa a faixa de frequências que apresentam perda de retorno menor que -10 dB e é limitada pela frequência inferior (f_{inf}) e a frequência superior (f_{sup}), e que a frequência central apresenta o ponto de menor perda de retorno, em dB, sendo assim chamada de frequência de ressonância (f_r).

Assim, a largura de banda pode ser calculada pelo intervalo entre as frequências que apresentam largura de banda igual a -10 dB, assim como na Equação 4.

$$BW = f_{sup} - f_{inf} \quad (4)$$

Segundo Holanda (2016), as antenas podem ser classificadas de acordo com sua largura de banda em antenas de banda estreita e antenas de banda larga. A classificação se dá pela largura de banda percentual, calculada com base na Equação 5 (GHAVAMI, 2004).

$$BW = \frac{f_{sup} - f_{inf}}{f_c} \times 100\% \quad (5)$$

De acordo com Almeida Filho (2010), a classificação das antenas com base na largura de banda se dá de acordo com a Tabela 1.

Tabela 1 - Classificação de antenas com base na largura de banda.

Largura de Banda Percentual	Classificação
De 0% a 1%	Banda estreita
De 1% a 20%	Banda larga
Acima de 20%	Banda Ultra Larga

Fonte: Adaptado de Almeida Filho, 2020.

O critério de perda de retorno de -10 dB utilizado para a definição da faixa de operação da antena é adotado com base no coeficiente de reflexão T do circuito da antena, ou seja, na relação entre potência radiada e a potência refletida pela antena.

No geral, considera-se que a potência refletida deve ser no máximo 10 % da potência total incidente no circuito. Assim, a perda de retorno (RL) máxima para que esse critério seja cumprido é de -10 dB de acordo com a Equação 6 (POZAR, 2012).

$$RL = -20 \times \log|T| \quad (6)$$

2.1.5 Impedância e Carta de Smith

A impedância do circuito da antena é um parâmetro de grande relevância para seu devido funcionamento. Assim como foi falado na seção 2.1.4, uma alta reflexão de potência no circuito diminui a capacidade de transmissão ou de recebimento de dados por uma antena. Esse fenômeno é causado por causa de uma falha em casamento de impedância.

O conceito de casamento de impedância, segundo Boylestad (2013), resulta no fenômeno de máxima transferência de potência. Considerando o circuito equivalente de Thévenin mostrado na Figura 6, é possível calcular os valores de Z_{TH} e uma carga Z_L e a propriedade responsável pela máxima transferência de potência.

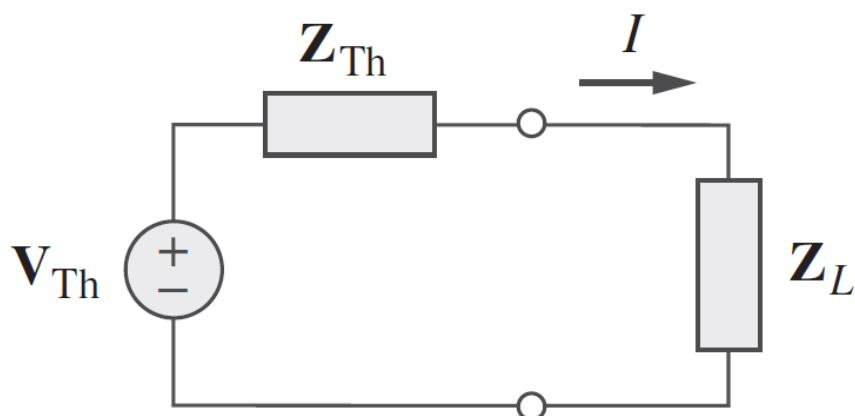


Figura 6 - Circuito Equivalente de Thevenin.

Fonte: Boylestad, 2013.

Considerando Z_{TH} e Z_L na forma retangular nas Equações 7 e 8, a corrente I do circuito é representada pela Equação 9.

$$Z_{TH} = R_{TH} + jX_{TH} \quad (7)$$

$$Z_L = R_L + jX_L \quad (8)$$

$$I = \frac{V_{TH}}{Z_{TH} + Z_L} = \frac{V_{TH}}{(R_{TH} + jX_{TH}) + (R_L + jX_L)} \quad (9)$$

Assim, a potência média entregue à carga Z_L é:

$$P = \frac{1}{2} |I|^2 R_L = \frac{|V_{TH}|^2 R_L}{2[(R_{TH} + R_L)^2 + (X_{TH} + X_L)^2]} \quad (10)$$

Com o valor de Z_{TH} fixo, pode-se encontrar os valores de R_L e X_L para que a potência entregue à carga seja máxima, por meio das derivadas parciais $\partial P/\partial R_L$ e $\partial P/\partial X_L$, fazendo-as iguais a zero.

$$\frac{\partial P}{\partial R_L} = \frac{|V_{TH}|^2 R_L (X_{TH} + X_L)}{[(R_{TH} + R_L)^2 + (X_{TH} + X_L)^2]^2} \quad (11)$$

$$\frac{\partial P}{\partial X_L} = \frac{|V_{TH}|^2 [(R_{TH} + R_L)^2 + (X_{TH} + X_L)^2 - 2R_L(R_{TH} + R_L)]}{2[(R_{TH} + R_L)^2 + (X_{TH} + X_L)^2]^2} \quad (12)$$

Fazendo $\partial P/\partial R_L$ e $\partial P/\partial X_L$ iguais a zero, temos que:

$$X_L = -X_{TH} \quad (13)$$

$$R_L = \sqrt{R_{TH}^2 + (X_{TH} + X_L)^2} \quad (14)$$

Portanto, para a ocorrência da máxima transferência de potência e conseqüentemente do casamento de impedância, Z_L e Z_{TH} devem ser conjugados, obedecendo à Equação 15.

$$Z_L = R_L + jX_L = R_{TH} - jX_{TH} = Z_{TH}^* \quad (15)$$

A perda causada pela reflexão é relacionada com a diferença entre a impedância da carga Z_L e a impedância Z_{TH} . Conforme Hayt Junior (2013), em casos de reflexão, parte da potência que seria transmitida para a retorna à fonte. Considerando o circuito da Figura 7, com uma linha de transmissão de impedância Z_0 e a carga com impedância $Z_L = R_L + jX_L$, pode-se calcular o coeficiente de reflexão T por meio da Equação 16.

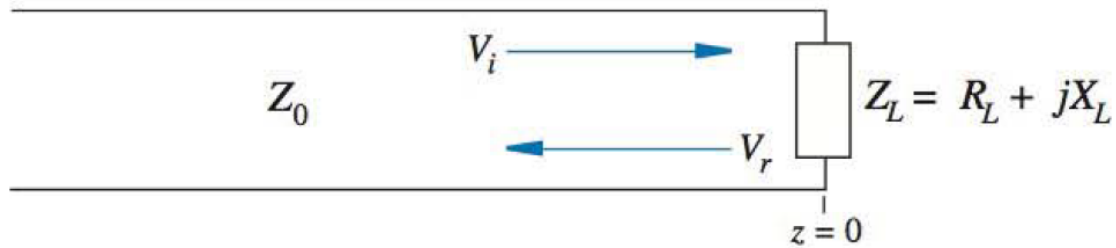


Figura 7 - Circuito de Linha de transmissão Z_0 e carga Z_L .

Fonte: Hayt Junior, 2013.

$$T = \frac{V_r}{V_i} = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} = |T|e^{j\phi_r} \quad (16)$$

Para antenas, a diferença entre as impedâncias Z_L e Z_0 representa a perda de potência que seria irradiada. A visualização gráfica da impedância de entrada da antena é geralmente feita pela Carta de Smith. Por meio desta é possível obter parâmetros da antena como coeficiente de reflexão e impedância de entrada do circuito (POZAR, 2012).

Em concordância com Hayt Junior (2013), o gráfico consiste em um círculo de raio unitário que, utilizando coordenadas polares, apresenta curvas de resistência e reatância constantes, capazes de descrever uma impedância. A Figura 8 apresenta um modelo de Carta de Smith, com as curvas de resistência constante e reatância constante destacadas.

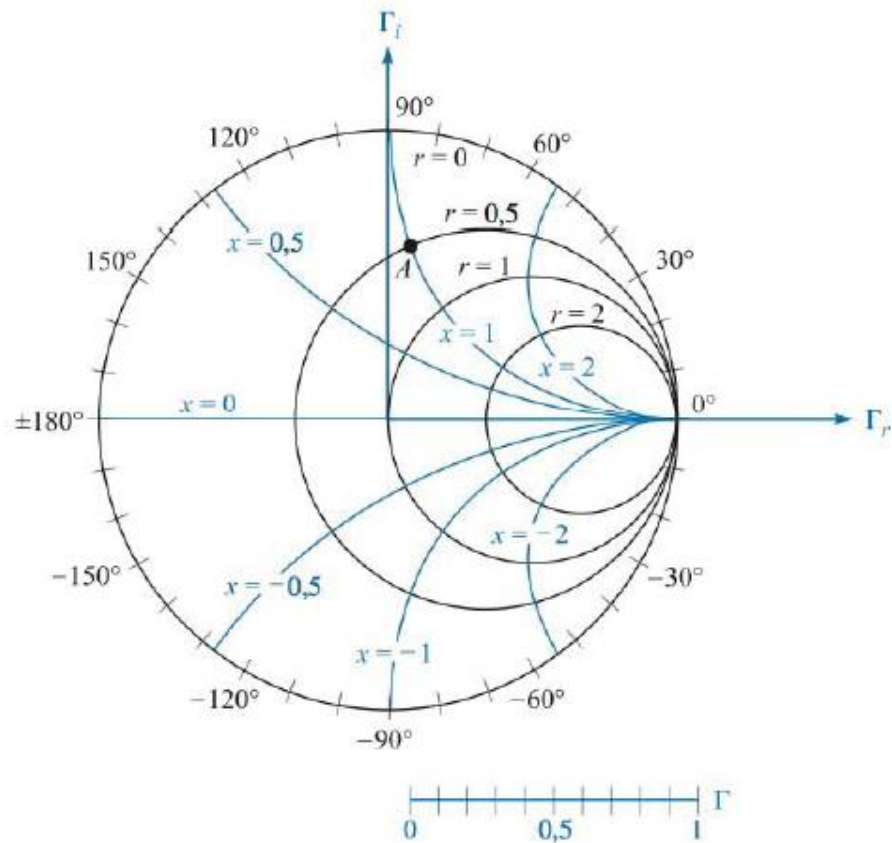


Figura 8 - Carta de Smith.

Fonte: Hayt Junior, 2013.

No geral, as impedâncias localizadas na Carta de Smith são normalizadas, ou seja, são representadas pela razão entre sua impedância real e a impedância característica da linha Z_0 . Também é possível, pelo gráfico obter o coeficiente de reflexão em sua forma complexa $|\Gamma|e^{j\theta}$.

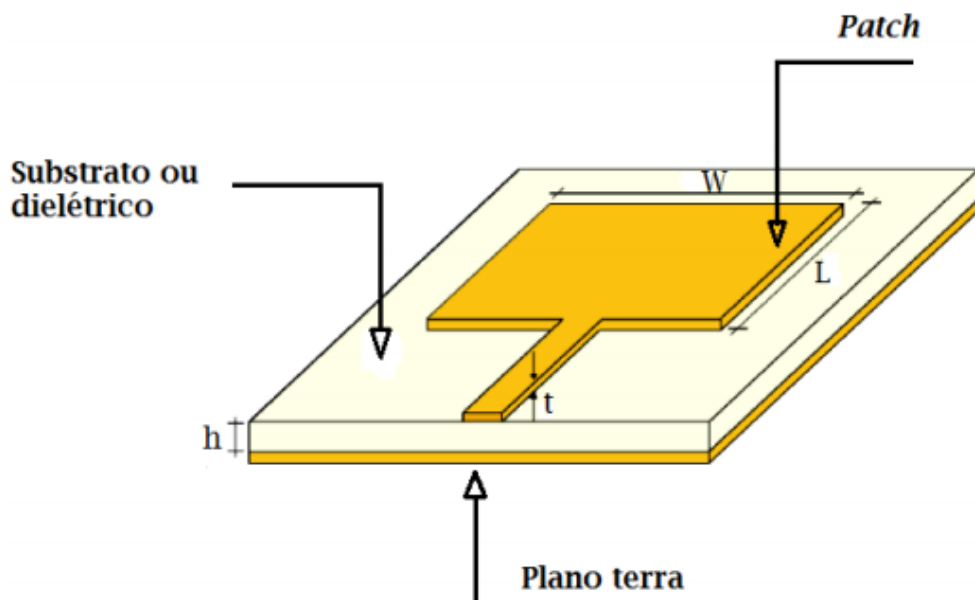
3 ANTENAS DE MICROFITA

O modelo de antena de microfita proposta por George A. Deschamps em 1953 utilizava de tecnologia de circuito impresso para composição de suas partes: a linha de transmissão e o patch como elemento radiante. A facilidade de fabricação da estrutura possibilita uma vasta remodelagem de seus elementos.

Entre outras vantagens da estrutura de microfita pode-se notar a pequena dimensão e peso, tornando-a capaz de ser utilizadas para estruturas portáteis ou até moldadas para superfícies não planas e a versatilidade em frequência de ressonância e polarização de onda. No entanto, as antenas de microfita apresentam baixa eficiência e ganho e uma estreita largura de banda. (BALANIS, 2005)

As estruturas que compõem as antenas de microfita são o *patch* condutor, responsável pela radiação, o plano de terra também condutor, e o substrato dielétrico entre eles. Conforme Balanis (2005), a espessura do substrato h deve ser uma pequena fração do comprimento de onda no espaço livre ($0,003\lambda_0 < h < 0,05\lambda_0$).

Figura 9 - Antena de Microfita.

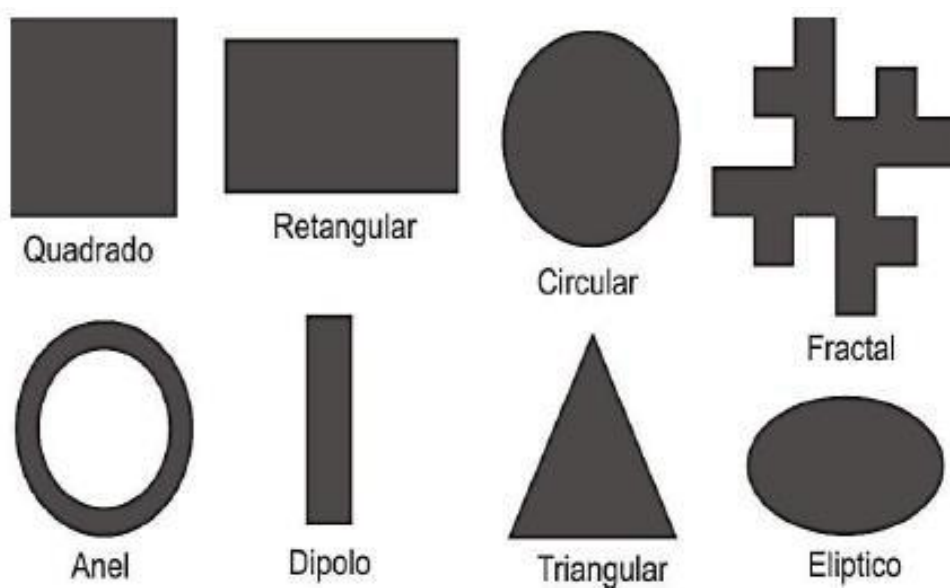


Fonte: Silveira, 2015.

O *patch* condutor pode assumir vários formatos, e o material utilizado para sua composição é geralmente cobre ou ouro. É o elemento radiador da antena, com alta condutividade e espessura pequena em relação ao comprimento de onda no espaço livre ($t \ll \lambda_0$).

Diversos formatos podem ser empregados para o *patch*, no entanto, cada formato resulta em uma distribuição de corrente diferente para a antena de microfita. Conforme Holanda (2016), pode-se utilizar formatos irregulares para o *patch*, mas no caso de fractais costuma-se trabalhar com formas regulares para facilitar a sua análise e seu projeto. Alguns exemplos de geometrias para *patch* de antena de microfita são mostrados na Figura 10.

Figura 10 - Exemplos de possíveis patches de microfita.



Fonte: Oliveira, Oliveira e Neto, 2014.

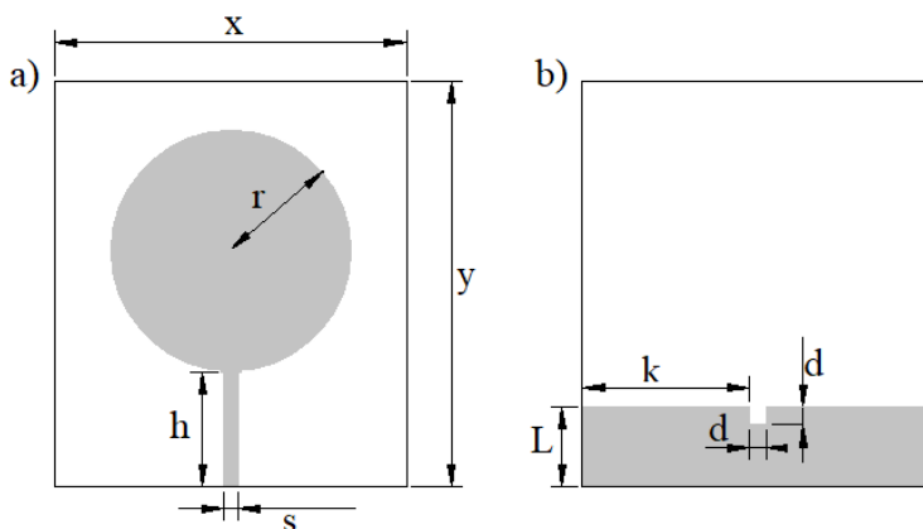
Ainda de acordo com Holanda (2016), os *patches* podem se combinar em uma antena formando uma estrutura chamada arranjo de microfita. O arranjo tem o intuito de adaptar o diagrama de radiação da antena com base na quantidade de *patches*, na localização e no espaçamento entre os elementos. Assim, pode-se obter diagramas com

configurações *broadside* com características de um diagrama omnidirecional, ou *end-fire* com comportamento diretivo.

O plano de terra é uma estrutura metálica que geralmente cobre completamente a parte traseira da antena, com o intuito de refletir a radiação tornando a antena com características diretivas. No projeto da antena admite-se que o plano de terra é infinito para simplificação dos cálculos. (MEDEIROS, 2013)

Uma técnica capaz de aumentar a largura de banda da antena de microfita é o plano de terra truncado, que consiste em retirar uma fração do plano de terra, como mostra a Figura 11.

Figura 11 - Plano de terra truncado com visão frontal em (a) e posterior em (b).



Fonte: Freitas et al., 2018.

O substrato é a estrutura que se situa entre o *patch* e o plano de terra e atua como um capacitor, armazenando energia. As propriedades de permissividade elétrica relativa ϵ_r e permeabilidade magnética relativa μ_r são importantes para a análise e o projeto da antena, assim como sua geometria (BARROS, 2012). De acordo com Balanis (2005), em projetos de antenas, os substratos costumam possuir constante dielétrica na faixa de 2,2 a 12.

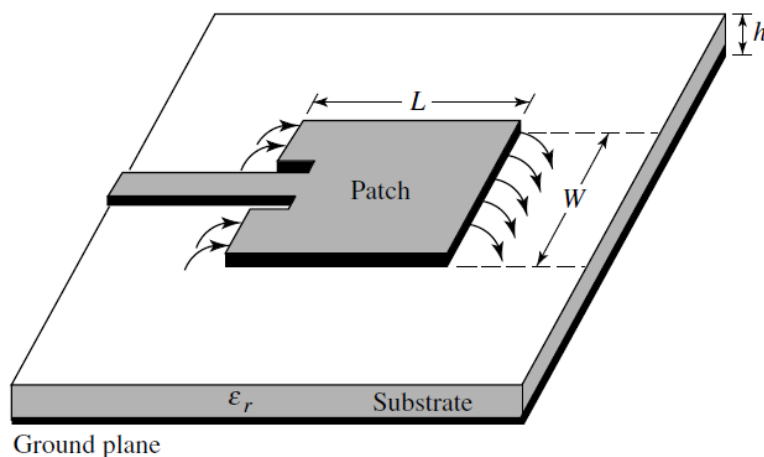
Antenas com substratos mais finos e com permissividade elétrica relativa mais alta são desejáveis para circuitos de microondas. No entanto, possuem mais perdas e uma largura de banda estreita. Por outro lado, substratos com grande espessura e baixa constante dielétrica tem um desempenho melhor com relação a eficiência e apresentam largura de banda maior. (BALANIS, 2005)

3.1 TÉCNICAS DE ALIMENTAÇÃO

As antenas de microfita podem ganhar alimentação eletromagnética por diversos métodos. Os quatro métodos de alimentação mais populares são a linha de microfita, a ponta de prova coaxial, acoplamento por abertura e acoplamento por proximidade.

A linha de microfita consiste em uma fita condutora fabricada com tecnologia de circuito impresso. Segundo Medeiros (2013), essa estrutura é adequada para aplicações em circuitos integrados de microondas por permitir à antena que seja totalmente planar. Essa estrutura permite um casamento de impedância melhor pela possibilidade de ajuste da largura e do comprimento da linha de microfita. A Figura 12 exemplifica um esquema de alimentação por linha de microfita.

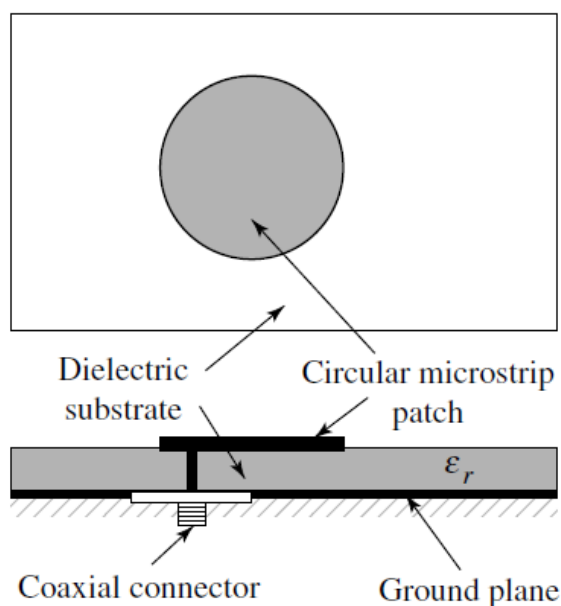
Figura 12 - Alimentação por Linha de Microfita.



Fonte: BALANIS, 2005.

A alimentação realizada por cabo coaxial baseia-se na perfuração do substrato pela parte traseira da antena para a conexão da ponta de prova do cabo coaxial com o *patch* condutor. O ajuste do casamento de impedância por esse método se dá apenas pela posição do ponto de alimentação, simplificando o projeto. No entanto, a fabricação da estrutura alimentada por cabo coaxial é mais difícil devido à perfuração realizada no substrato.

Figura 13 - Alimentação por ponta de prova coaxial.

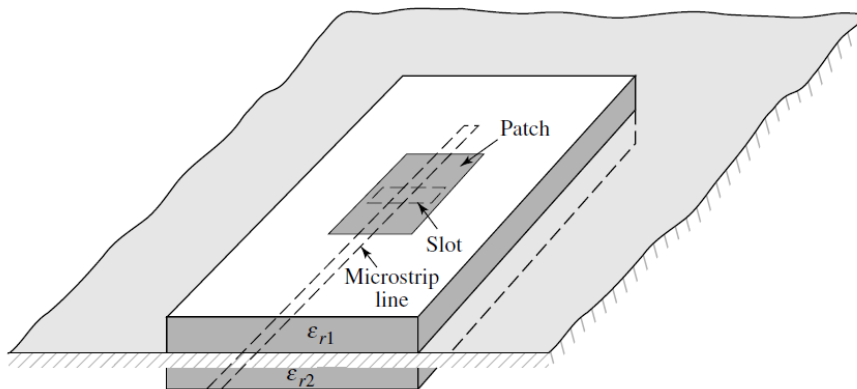


Fonte: BALANIS, 2005.

Os métodos de alimentação por acoplamento não utilizam de contato direto entre o *patch* radiante e a estrutura de guiamento da onda eletromagnética. De acordo com Balanis (2005), tanto o método de alimentação por linha de microfita quanto o cabo coaxial produzem radiação de polarização cruzada devido à geração de modos de ordem mais alta e os métodos de alimentação por acoplamento não têm esse efeito.

O acoplamento por abertura se dá por dois substratos separados por um plano de terra. Na parte baixa do substrato inferior é colocada uma linha de alimentação de microfita que é acoplada com o *patch* por meio de uma abertura no plano de terra que separa os dois substratos. Essa estrutura permite uma otimização independente do mecanismo de alimentação e do *patch* radiante.

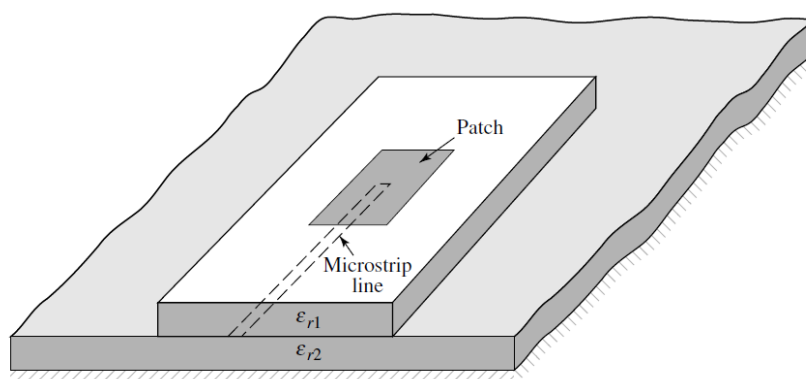
Figura 14 - Alimentação por acoplamento por abertura.



Fonte: BALANIS, 2005.

Por último, o acoplamento por proximidade é semelhante ao método de acoplamento por abertura, apenas com umas pequenas mudanças. A estrutura utilizada para esse método inverte as posições da linha de alimentação e o plano de terra. Além disso, o plano de terra não apresenta uma abertura.

Figura 15 - Alimentação por acoplamento por proximidade.



Fonte: BALANIS, 2005.

3.2 MÉTODOS DE ANÁLISE E PROJETO

As propriedades de uma antena indicam a sua utilização. Estas propriedades estão ligadas a características estruturais da antena, como material e geometria empregados no *patch* e no substrato, ou o método de alimentação.

O projeto e a análise de uma antena de microfita podem ser feitas com diversas técnicas. Conforme Almeida Filho (2010), dividem-se em dois grupos as técnicas de análise e projeto: modelos de onda completa e modelos aproximados.

Os modelos de onda completa utilizam a distribuição de corrente elétrica no *patch* e no plano de terra e utilizam cálculos muito complexos de métodos numéricos que demandam um grande esforço computacional, porém com resultados mais precisos até em faixas de frequência mais altas. (VASCONCELOS, 2006)

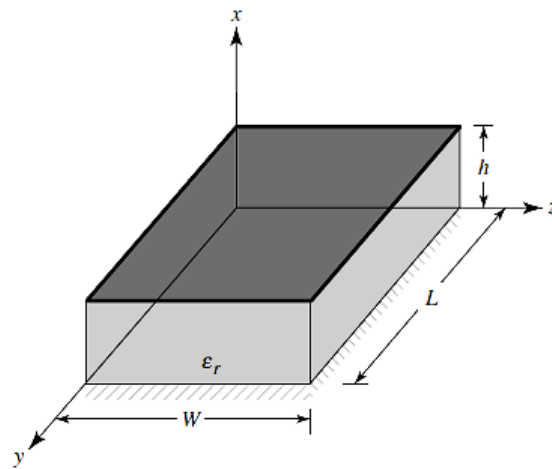
Os métodos numéricos mais utilizados quando se trata de onda completa são o Método dos Momentos (MoM), o Método dos Elementos Finitos (FEM) e o Método das Diferenças Finitas no Domínio do Tempo (FDTD). (HOLANDA, 2016)

O modelos aproximados simplificam a análise da estrutura da antena por meio da desconsideração de alguns fenômenos como ondas de superfície e dispersão (ALMEIDA FILHO, 2010). Os modelos mais conhecidos são o Modelo da Linha de Transmissão (TLM) e o Modelo da Cavidade, por apresentar cálculos simplificados e aproximados para faixas de frequências mais baixas.

3.2.1 Modelo da Cavidade

O modelo da cavidade é o método de análise que trata a antena como uma cavidade limitada por faces superior e inferior consideradas condutores elétricos perfeitos e faces laterais consideradas condutores magnéticos perfeitos. (OLIVEIRA, 2011) A Figura 16 representa a cavidade considerada para o método.

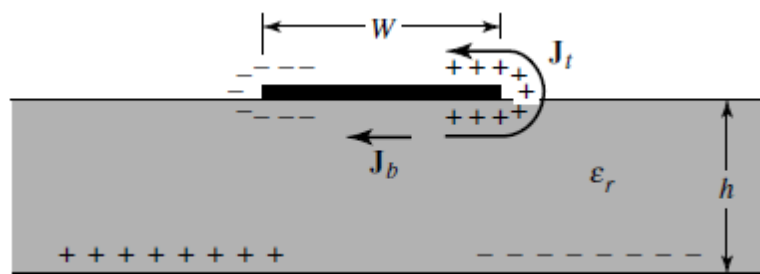
Figura 16 - Consideração de um patch retangular de microfita para o modelo da cavidade.



Fonte: Balanis, 2005.

Com a energização do *patch*, gera-se uma distribuição de corrente em suas superfícies superior J_t e inferior J_b . Essas correntes surgem devido à atração e repulsão de cargas entre a superfície inferior do *patch* e o plano de terra, atraindo as cargas opostas localizadas no inferior do *patch* e empurrando cargas de mesmo sinal para as bordas e a face superior, como representado na Figura 17. Em razão da pequena espessura da antena, há uma considerável reflexão das ondas no interior do substrato quando atingem as bordas do *patch*, praticamente desconsiderando os efeitos de franjeamento e considerando os campos na estrutura do substrato constantes, além do *patch* e o plano de terra como condutores perfeitos (BALANIS, 2005).

Figura 17 - Distribuição de corrente nas superfícies do patch e do plano de terra.



Fonte: Balanis, 2005.

Segundo Holanda (2010), os campos no interior da cavidade podem ser definidos por meio de potencial vetorial como na equação de Helmholtz na Equação 17, considerando o substrato com permissividade elétrica relativa ϵ_r . A Equação 18 é a solução da Equação 17 utilizando a técnica de separação de variáveis.

$$\nabla^2 A_x + k^2 A_x = 0 \quad (17)$$

$$A_x = [A_1 \cos(k_x x) + B_1 \text{sen}(k_x x)][A_2 \cos(k_y y) + B_2 \text{sen}(k_y y)][A_3 \cos(k_z z) + B_3 \text{sen}(k_z z)] \quad (18)$$

Onde k_x , k_y e k_z são os números de onda ao longo das direções x , y e z , respectivamente. Os campos elétricos e magnéticos no interior da cavidade são descritos pelo potencial vetorial mostrado nas Equações 19 a 21.

$$E_x = j \frac{1}{\omega \epsilon \mu} \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + k^2 \right) A_x \quad H_x = 0 \quad (19)$$

$$E_y = j \frac{1}{\omega \epsilon \mu} \left(\frac{\partial^2 A_x}{\partial x \partial y} \right) \quad H_y = \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial A_x}{\partial z} \right) \quad (20)$$

$$E_z = j \frac{1}{\omega \epsilon \mu} \left(\frac{\partial^2 A_x}{\partial x \partial z} \right) \quad H_z = -\frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial A_x}{\partial y} \right) \quad (21)$$

Considerando as seguintes condições de contorno:

$$E_y(x' = 0, 0 \leq y' \leq L, 0 \leq z' \leq W) = E_y(x' = h, 0 \leq y' \leq L, 0 \leq z' \leq W) = 0 \quad (22)$$

$$H_y(0 \leq x' \leq h, 0 \leq y' \leq L, z' = 0) = H_y(0 \leq x' \leq h, 0 \leq y' \leq L, z' = W) = 0 \quad (23)$$

$$H_z(0 \leq x' \leq h, y' = 0, 0 \leq z' \leq W) = H_z(0 \leq x' \leq h, y' = L, 0 \leq z' \leq W) = 0 \quad (24)$$

Onde x' , y' e z' representando as coordenadas usadas para o campo dentro da cavidade. Aplicando as condições de contorno, tem-se que $B_1 = B_2 = B_3 = 0$ e as Equações 25 a 27.

$$k_x = \frac{m\pi}{h}, m = 0, 1, 2, \dots \quad (25)$$

$$k_z = \frac{p\pi}{W}, p = 0, 1, 2, \dots \quad (26)$$

$$k_y = \frac{n\pi}{L}, n = 0, 1, 2, \dots \quad (27)$$

Assim, a Equação 28 define o potencial vetorial A_x no interior da cavidade.

$$A_x = A_{mnp} \cos(k_x x') \cos(k_y y') \cos(k_z z') \quad (28)$$

Onde A_{mnp} representam os coeficientes de amplitude de cada modo mnp e m , n e p representam respectivamente o número de variações de campo em meio período nas direções x , y e z . (BALANIS, 2005)

Como os números de onda k_x , k_y e k_z estão sujeitos à restrição na Equação 29, a frequência de ressonância da cavidade pode ser calculada pela Equação 30.

$$k_x^2 + k_y^2 + k_z^2 = \left(\frac{m\pi}{h}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{L}\right)^2 + \left(\frac{p\pi}{W}\right)^2 = k_r^2 = \omega_r^2 \mu \epsilon \quad (29)$$

$$f_{r_{mnp}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{\mu\epsilon}} \sqrt{\left(\frac{m\pi}{h}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{L}\right)^2 + \left(\frac{p\pi}{W}\right)^2} \quad (30)$$

O modo que apresenta frequência de ressonância mais baixa é chamado modo dominante. Para uma antena de microfita com $L > W > h$ o modo dominante é o modo TM_{010} , que tem a frequência de ressonância dada pela Equação 31.

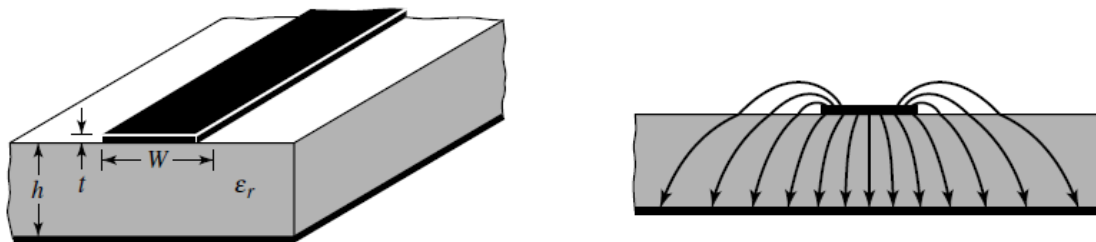
$$f_{r_{010}} = \frac{1}{2L\sqrt{\mu\epsilon}} = \frac{v_0}{2L\sqrt{\epsilon_r}} \quad (31)$$

3.2.2 Modelo da Linha de Transmissão

O modelo da linha de transmissão é mais simples e menos preciso que os outros métodos citados, porém ainda proporciona uma boa percepção física de sua modelagem. Apesar de sua menor exatidão, apresenta uma facilidade de obtenção de casamento de impedância. (HOLANDA, 2016)

Conforme Balanis (2005), este modelo considera o efeito de franjeamento no *patch* devido às dimensões finitas da estrutura. No plano xy a quantidade de franjeamento é função da razão entre o comprimento do *patch* L e a altura do substrato h (L/h) e da constante dielétrica do substrato ϵ_r . O efeito do franjeamento, mostrado na Figura 18, faz o *patch* ou a linha de microfita pareçam eletricamente maiores do que suas dimensões reais.

Figura 18 - Linha de microfita e linhas de campo elétrico.



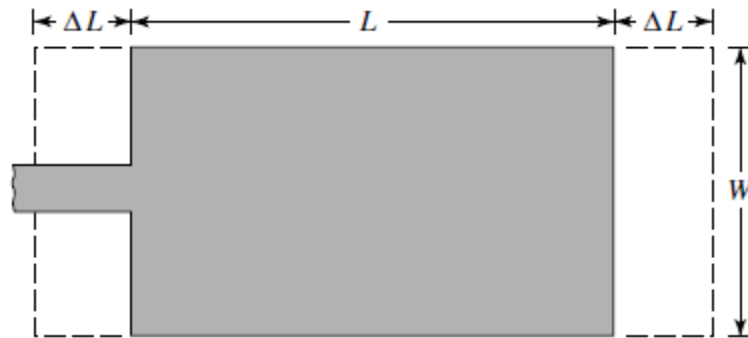
Fonte: Balanis, 2005.

Por meio da Figura 18, pode-se observar as linhas de campo tanto no ar quanto no substrato de permissividade relativa ϵ_r . Devido a esse efeito deve-se considerar uma permissividade elétrica efetiva ϵ_{ref} que leva em consideração a permissividade do ar e do substrato, considerando assim que o *patch* e a linha de transmissão se comportem como uma estrutura ideal sem o efeito do franjeamento. A Equação 32 (BALANIS, 2005) permite a obtenção da constante dielétrica efetiva ϵ_{ref} .

$$\epsilon_{\text{ref}} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[1 + 12 \frac{h}{W} \right]^{-1/2} \quad (32)$$

Como o efeito de franjeamento ocorre também no comprimento do *patch*, este parece também eletricamente mais comprido do que a dimensão física real, portanto, é considerado que o seu comprimento é aumentado em $2\Delta L$, assim como na Figura 19, sendo ΔL uma função da constante dielétrica efetiva ϵ_{ref} . O cálculo de ΔL em função de ϵ_{ref} pode ser obtido pela Equação 33 (HAMMERSTAD, 1975).

Figura 19 - Comprimento real e comprimento elétrico de um patch retangular.



Fonte: Balanis, 2005.

$$\frac{\Delta L}{h} = 0,412 \frac{(\epsilon_{\text{reff}} + 0,3) \left(\frac{W}{h} + 0,264\right)}{(\epsilon_{\text{reff}} - 0,258) \left(\frac{W}{h} + 0,8\right)} \quad (33)$$

Como o comprimento do *patch* foi estendido por ΔL em cada lado, então o comprimento efetivo do *patch* pode ser agora calculado pela Equação 34.

$$L_{\text{ef}} = L + 2\Delta L \quad (34)$$

Para o modo dominante TM_{010} a frequência de ressonância da antena é função do comprimento, como mostrado na Equação 35.

$$f_{r_{010}} = \frac{1}{2L\sqrt{\mu\epsilon}} = \frac{v_0}{2L\sqrt{\epsilon_r}} \quad (35)$$

A obtenção da formulação anterior permite o projeto das dimensões do *patch*, sendo elas largura W e comprimento L , a partir dos dados de frequência de ressonância f_r , espessura do substrato h e constante dielétrica do substrato ϵ_r , a partir das Equações 36 (BAHL; BHARTIA, 1980) e 37.

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

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

As dimensões de uma alimentação por linha de microfita também podem ser calculadas com base nos dados anteriores. Segundo Pozar (2012), a linha de microfita deve possuir comprimento inferior a 1/4 do comprimento de onda equivalente à frequência de ressonância da antena. A Equação 38 demonstra a obtenção do comprimento L_0 da linha de microfita.

$$L_0 = \frac{c}{4f_r\sqrt{\epsilon_{ref}}} \quad (38)$$

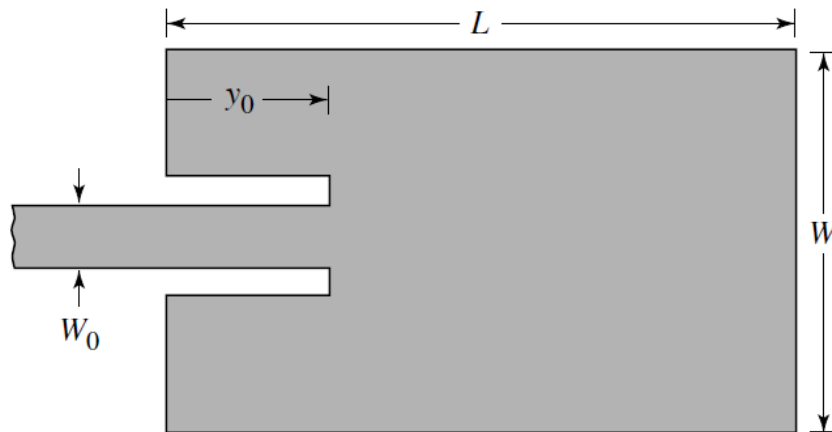
Conforme Balanis (2005), a largura W_0 da linha de microfita pode ser calculada pela Equação 39. A solução da equação pode ser obtida por meio da aplicação de um método numérico para encontrar raízes.

$$Z_0 = \begin{cases} \frac{60}{\sqrt{\epsilon_{ref}}} \times \ln \left[\frac{8h}{W_0} + \frac{W_0}{4h} \right], & \frac{W_0}{h} \leq 1 \\ \frac{120\pi}{\sqrt{\epsilon_{ref}} \left[\frac{W_0}{h} + 1,393 + 0,667 \times \ln \left(\frac{W_0}{h} + 1,444 \right) \right]}, & \frac{W_0}{h} > 1 \end{cases} \quad (39)$$

Como diz Holanda (2016), ainda que alguns métodos de análise ou projeto da antena de microfita tragam resultados precisos, em alguns casos ainda há um desvio a ser considerado por uma falta de devido casamento de impedância. Assim, consideram-se técnicas de casamento de impedância que objetivam transferir a máxima potência para a antena.

O método de *inset feed* promove o casamento de impedância por meio da adição de duas fendas no patch paralelas à linha de transmissão de microfita. As dimensões das fendas y_0 e y_1 , mostradas na Figura 20, podem ser obtidas por meio da devida modelagem.

Figura 20 - Representação da técnica de inset feed.



Fonte: Balanis, 2005.

O comprimento y_0 do inset feed pode ser calculado pela equação 40 (BALANIS, 2005).

$$R_{in}(y = y_0) = \frac{1}{2(G_1 \pm G_{12})} \cos^2 \left(\frac{\pi}{L} y_0 \right) \quad (40)$$

Onde R_{in} é a impedância de entrada da antena e G_1 e G_{12} são as condutâncias associadas à antena e à relação dos campos irradiados pelo ressonador respectivamente e podem ser obtidas pelas Equações 41 a 43 com base nas dimensões do *patch*. (BALANIS, 2005)

$$R_{in} = \frac{1}{2(G_1 \pm G_{12})} \quad (41)$$

$$G_1 = \frac{1}{120\pi^2} \int_0^\pi \left[\frac{\sin\left(\frac{k_0 W}{2} \cos \theta\right)}{\cos \theta} \right]^2 \sin^3 \theta \, d\theta \quad (42)$$

$$G_{12} = \frac{1}{120\pi^2} \int_0^\pi \left[\frac{\sin\left(\frac{k_0 W}{2} \cos \theta\right)}{\cos \theta} \right]^2 J_0(k_0 L \sin \theta) \sin^3 \theta \, d\theta \quad (43)$$

Onde k_0 é o número de onda no espaço livre e J_0 é a função de Bessel de primeira espécie e ordem 0.

Contudo, Ramesh e Yip (2003) mostra uma simplificação do equacionamento para uma equação polinomial dependente da constante dielétrica e do comprimento do patch que pode ser usado para substratos com ϵ_r na faixa de 2 a 10. A equação 44 apresenta a simplificação de Ramesh e Yip (2003).

$$y_0 = 10^{-4} \{ 0,001699\epsilon_r^7 + 0,13761\epsilon_r^6 - 6,1783\epsilon_r^5 + 93,187\epsilon_r^4 - 682,69\epsilon_r^3 + 2561,9\epsilon_r^2 - 4043\epsilon_r + 6697 \} \frac{L}{2} \quad (44)$$

Por fim, a largura y_1 do *inset feed* se dá geralmente pela metade da largura da linha de microfita W_0 . Assim, o ajuste por meio do *inset feed* promove o casamento de impedância da antena diminuindo a sua perda de retorno.

4 ANTENAS DE RESSOADOR DIELÉTRICO

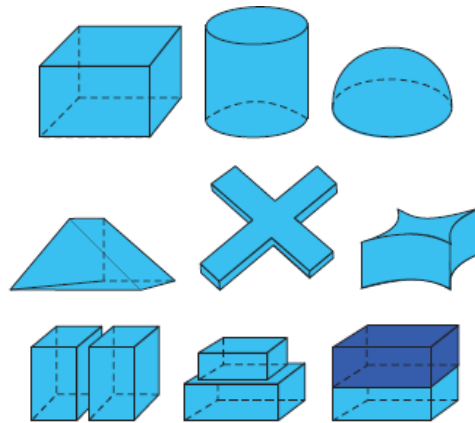
Antenas de Ressorador Dielétrico (DRA) consistem em dispositivos de microondas com ressoadores não metálicos, ou seja, a estrutura responsável pela radiação de campo eletromagnético é de material dielétrico. Richtmyer (1939) propôs inicialmente que um objeto de formato adequado feito de material dielétrico pode funcionar como ressoador para altas frequências por meio de uma formulação matemática sobre potenciais gerados por uma esfera e um anel dielétricos.

No fim da década de 1960 iniciou-se o desenvolvimento de materiais cerâmicos de baixa perda para utilização como ressoadores dielétricos. O estudo de formatos cilíndricos, retangulares e semiesféricos para ressoadores dielétricos iniciou-se na década de 1980, com Long; McAllister; Shen (1983), McAllister; Long (1983) e McAllister; Long (1984).

Conforme Petosa (2007), o período da década de 1990 apresentou estudos de arranjos lineares e planares de DRA, apresentando capacidade de direcionamento de feixe com elementos defasados, como também o desenvolvimento de Antenas de Ressoradores Ferrimagnéticos (FRA). A utilização de compostos de ferrita na estrutura da FRA permite a reconfiguração da antena através da imersão em um campo magnético estático (PETOSA, 1994).

Com ênfase em projetos compactos, houve também pesquisas em novos formatos de DRA para aumentar o desempenho em largura de banda para atender requisitos de banda larga emergente nessa década. Na Figura 21 são apresentadas diferentes geometrias que podem ser utilizadas como elemento radiante.

Figura 21 – Formatos diversos de DRA.

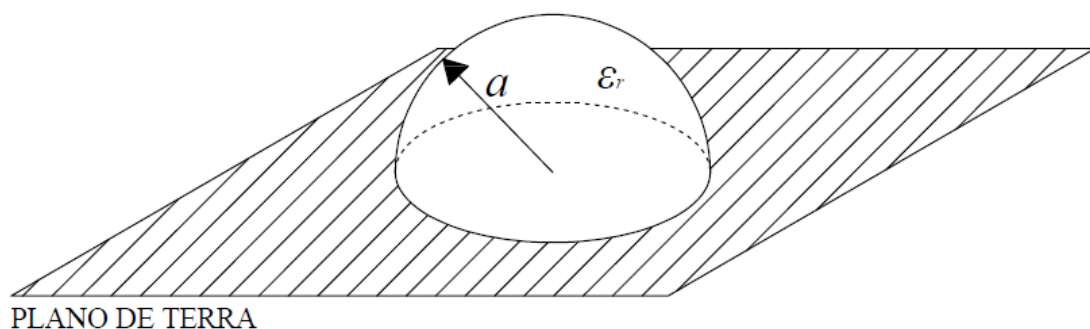


Fonte: Keyrouz e Caratelli, 2016.

Os formatos mais utilizados de DRA são os semiesféricos, cilíndricos e retangulares. Para essas geometrias, soluções analíticas podem ser utilizadas para prever frequência de ressonância, fator de qualidade de radiação Q e diagramas de radiação.

O DRA semiesférico consiste em uma peça dielétrica com constante dielétrica ϵ_r e raio a montada em cima de um plano de terra, como mostra a Figura 22. A geometria semiesférica é limitada em grau de liberdade, sendo o raio da semiesfera o único parâmetro de projeto além da constante dielétrica. Ainda, a fabricação de peças semiesféricas é de grande dificuldade.

Figura 22 - DRA semiesférico.

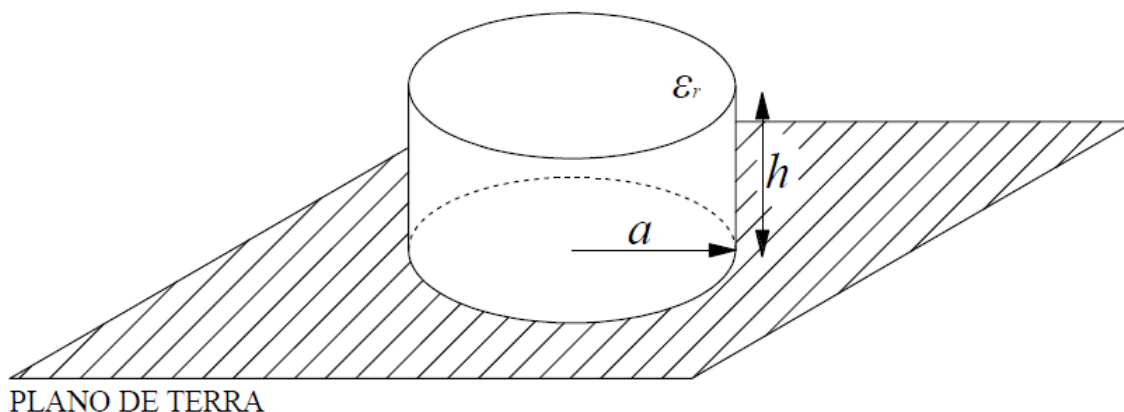


Fonte: Autoria Própria, 2019.

O DRA de formato cilíndrico é definida por um ressoador cilíndrico com altura h , raio a e constante dielétrica ϵ_r sobre um plano de terra, conforme a Figura 23. O formato cilíndrico oferece uma flexibilidade maior que o semiesférico, pois suas

características de ressonância dependem de duas dimensões: o raio e a altura. A fabricação de peças cilíndricas se faz mais simples se comparado a semiesféricas.

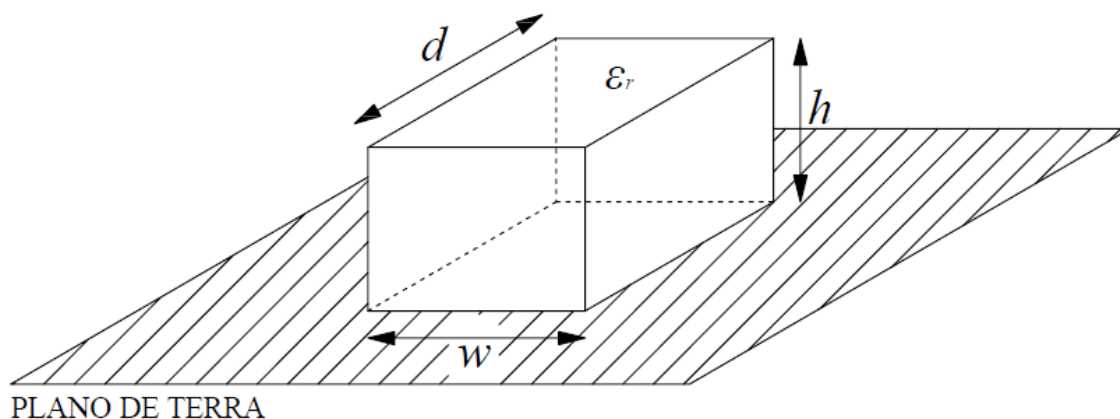
Figura 23 – DRA cilíndrico.



Fonte: Autoria Própria, 2019.

Por fim, a antena com ressoador dielétrico de formato retangular é caracterizada por uma peça com seção retangular com altura h , largura w , profundidade d e constante dielétrica ϵ_r sobre um plano de terra, como apresentado na Figura 24. A geometria de seção retangular apresenta um segundo grau de liberdade, sendo o formato mais versátil.

Figura 24 – DRA retangular.



Fonte: Autoria Própria, 2019.

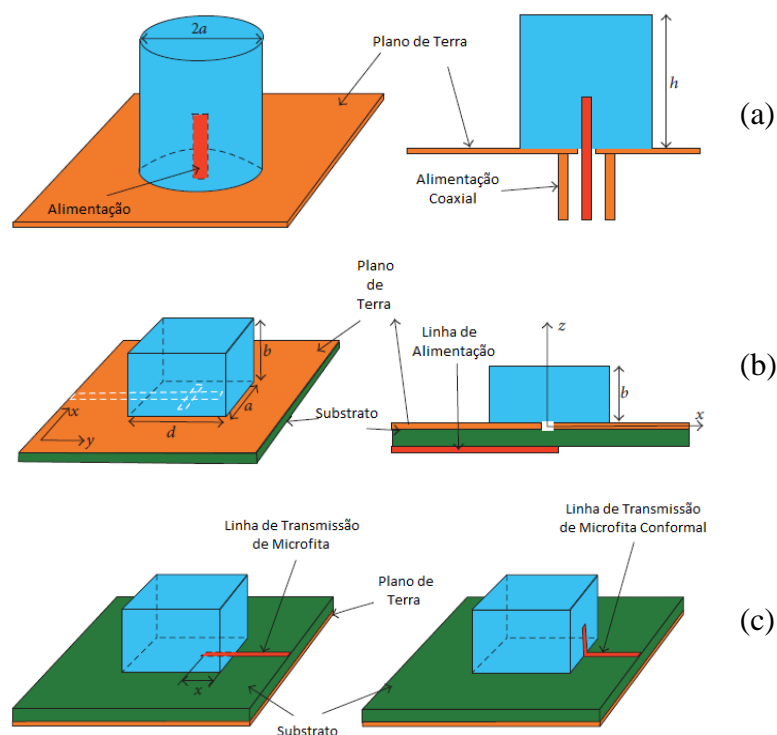
Entre as principais características observados em DRAs nota-se que o tamanho do DRA é proporcional a $\lambda_0/\sqrt{\epsilon_r}$, com um range considerável de ϵ_r de 8 até mais de 100,

além da manutenção da eficiência de radiação com a utilização de materiais com pouca perda. (PETOSA, 2007)

Segundo Silva (2019), o princípio de funcionamento de uma DRA é semelhante à antena de microfita, com o ressonador sendo excitado por meio de uma alimentação externa. Vários mecanismos de alimentação podem ser utilizados em DRAs, como sondas, linhas de microfita, guia de onda planar, ou alimentação por abertura, tornando a estrutura integrável a várias tecnologias existentes.

Diversos modos podem ser excitados dentro do DRA, de modo que os diagramas de radiação sejam similar a dipolos curtos elétricos e magnéticos, apresentando características broadside ou omnidirecionais. (PETOSA, 2007) Algumas formas de alimentação do ressonador são mostradas na Figura 25.

Figura 25 - Métodos de alimentação de DRA. (a) cabo coaxial, (b) abertura e (c) linha de microfita



Fonte: Keyrouz e Caratelli, 2016.

A alimentação por linha de microfita em DRAs pode se mostrar de duas formas diferentes: linha de microfita ou linha de microfita conformal, como mostrado na Figura

25. Kranenburg e Long (1988) analisaram a posição dos elementos na estrutura para que haja o melhor acoplamento.

A definição da distância x na Figura 25-c foi determinada ideal como um pouco menor do que um quarto do comprimento de onda guiada do DRA. As dimensões W_0 e L_0 da linha de microfita se permitem ser obtidas através das equações 38 e 39 do método da linha de transmissão na seção 3.2.2.

Os métodos de alimentação por cabo coaxial geralmente exigem perfuração do ressoador. Portanto, esse método não se faz recomendado pelo motivo de o material talvez não suportar a perfuração.

4.1 MODELAGEM DA DRA

A escolha da estrutura DRA para se utilizar influencia em análises específicas, como frequência de ressonância. Neste trabalho serão consideradas DRAs cilíndricas pelo seu grau de liberdade em duas dimensões (raio e altura) e sua facilidade de fabricação.

Com base em Long, McAllister e Shen (1983), é possível determinar os campos dentro de um ressoador cilíndrico assim como sua frequência de ressonância. O cilindro é analisado como uma cavidade com suas faces consideradas condutores magnéticos perfeitos. Para essa cavidade, as funções de onda TE e TM para o eixo z podem ser descritas pelas Equações 45 e 46.

$$\Psi_{TE_{n\pm m}} = J_n\left(\frac{X_{np}}{a}\rho\right) \begin{cases} \text{sen } n\varphi \\ \text{cos } n\varphi \end{cases} \text{sen}\left(\frac{2(m+1)\pi}{2d}\right) \quad (45)$$

$$\Psi_{TM_{n\pm m}} = J_n\left(\frac{X'_{np}}{a}\rho\right) \begin{cases} \text{sen } n\varphi \\ \text{cos } n\varphi \end{cases} \text{cos}\left(\frac{2(m+1)\pi z}{2d}\right) \quad (46)$$

Onde J_n é a função de Bessel de primeira ordem e X_{np} e X'_{np} são raízes que fazem com que $J_n(X_{np}) = J_n(X'_{np}) = 0$. A frequência de ressonância pode ser obtida através da Equação 47, com os números de onda k_p e k_z expressos nas Equações 48 e 49 (SILVA, 2019).

$$k_p^2 + k_z^2 = k^2 = \omega^2\mu\epsilon \quad (47)$$

$$k_p = \left\{ \begin{array}{c} \frac{X_{np}}{a} \\ \frac{X'_{np}}{a} \end{array} \right\} \quad (48)$$

$$k_p = \frac{2(m+1)\pi}{2d} \quad (49)$$

Assim, a frequência da DRA cilíndrica pode ser definida pela Equação 50.

$$f_{nmp} = \frac{1}{2\pi a \sqrt{\mu \epsilon}} \sqrt{\left\{ \begin{array}{c} X_{np}^2 \\ X'_{np}^2 \end{array} \right\} + \left[\frac{(2m+1)\pi a}{2d} \right]^2} \quad (50)$$

Conforme o equacionamento em Long, McAllister e Shen (1983), o modo dominante (que possui a menor frequência de ressonância) se dá com $m = 0$, $n = 1$, $p = 1$ e com $X'_{11} = 1,841$. Assim, a frequência de ressonância no modo dominante pode ser obtida pela Equação 51, com a e d sendo o raio e a altura do cilindro, respectivamente.

$$f = \frac{1}{2\pi a \sqrt{\mu \epsilon}} \sqrt{X'_{11}{}^2 + \left[\frac{\pi a}{2d} \right]^2} \quad (51)$$

A estimativa da frequência de ressonância do DRA pode então ser calculada pela Equação 51, com base nas suas dimensões e no material utilizado, considerando a permissividade elétrica e a permeabilidade magnética.

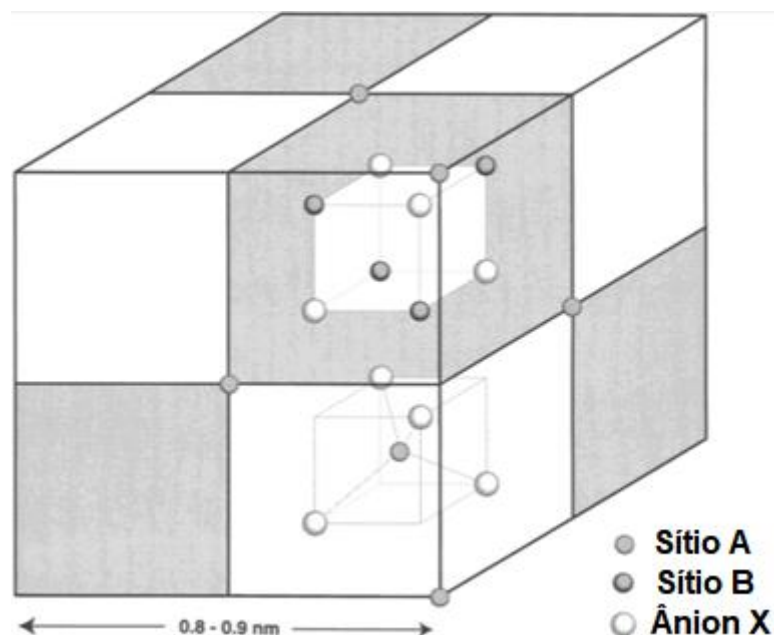
5 FERRITAS

Ferritas são materiais cerâmicos que apresentam características magnéticas. Para cada combinação de composições químicas e estruturais há uma ampla faixa de aplicações tecnológicas devido à alteração das propriedades magnéticas em cada tipo de estrutura cristalina (espinélio, granada, magnetoplumbita) (ASSIS, 2013). Por consequência de suas possíveis combinações químicas e estruturais, as ferritas possuem uma grande faixa de aplicações tecnológicas, como absorção de microondas em diferentes faixas de frequência em Paulo *et al* (2004).

De acordo com Santos (2011), as ferritas do tipo espinélio são mais interessantes tecnologicamente, devido a propriedades magnéticas, ópticas e elétricas. Além disso, apresentam alta estabilidade termodinâmica, baixa condutividade elétrica e resistência à corrosão. (ANTONIO, 2006)

A estrutura espinélio, determinada inicialmente por Bragg (1915) e Nishikawa (1915), é representada por uma célula cúbica de face centrada e geralmente apresentam a fórmula geral AB_2X_4 , onde A é um cátion bivalente e B é um cátion trivalente e X é um ânion. (SICKAFUS; WILLS; GRIMES, 1999) A Figura 26 apresenta uma célula de espinélio com duas estruturas AB_2X_4 representadas em dois octantes.

Figura 26 – Representação da estrutura espinélio.



Fonte: Sickafus, Wills, Grimes, 1999.

A classificação do espinélio divide as estruturas em dois tipos: espinélio normal e espinélio inverso. A diferença entre as estruturas pode ser observada com base nas posições dos átomos. Nas estruturas espinélio normais (AB_2X_4), os cátions A se localizam nos sítios tetraédricos e os cátions B se localizam em sítios octaédricos. Contudo, nas estruturas espinélio inversas, os cátions bivalentes A e metade dos cátions trivalentes B se localizam nos sítios octaédricos e a outra metade dos cátions trivalentes B se localizam nos sítios tetraédricos.

Tratando de ferritas, que são óxidos cerâmicos, o ânion X refere-se ao átomo de oxigênio, e o cátion trivalente B refere-se ao ferro. Íons metálicos bivalentes podem assumir o valor do cátion A, como magnésio (Mg), ferro (Fe), manganês (Mn), cobalto (Co), níquel(Ni), zinco (Zn), cobre (Cu), cádmio(Cd).

Como o foco desta pesquisa é a ferrita de cobalto, o cátion bivalente A é o próprio cobalto, e a estrutura apresenta fórmula química $CoFe_2O_4$. Devido a características de alta coercividade e moderada magnetização de saturação, a ferrita de cobalto possui diversas aplicações industriais em gravação de dados e componentes eletrônicos utilizados em computadores e cartões magnéticos. (NASERI, 2010)

Conforme Vasconcelos (2010), as ferritas se caracterizam por uma alta resistividade, constante dielétrica na faixa de 10 a 15 e permeabilidade magnética descrita através de um tensor, denominado tensor de Polder. Isso quer dizer que as propriedades magnéticas do material são estabelecidas de acordo com a orientação de um campo magnético externo. Para um campo magnético estático aplicado nas direções x, y e z, o tensor permeabilidade magnética pode ser obtido pelas Equações 52 a 54.

$$\bar{\mu}_{H_x} = \mu_0 \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \mu_r & -jk_r \\ 0 & jk_r & \mu_r \end{bmatrix} \quad (52)$$

$$\bar{\mu}_{H_y} = \mu_0 \begin{bmatrix} \mu_r & 0 & -jk_r \\ 0 & 1 & 0 \\ jk_r & 0 & \mu_r \end{bmatrix} \quad (53)$$

$$\bar{\mu}_{H_z} = \mu_0 \begin{bmatrix} \mu_r & -jk_r & 0 \\ jk_r & \mu_r & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (54)$$

Os termos μ_r e k_r nas três direções descrevem-se por:

$$\mu_r = 1 - \frac{\gamma^2 H_0 4\pi M_s}{f^2 - (\gamma H_0)^2} \quad (52)$$

$$k_r = \frac{\gamma 4\pi M_s}{f^2 - (\gamma H_0)^2} \quad (53)$$

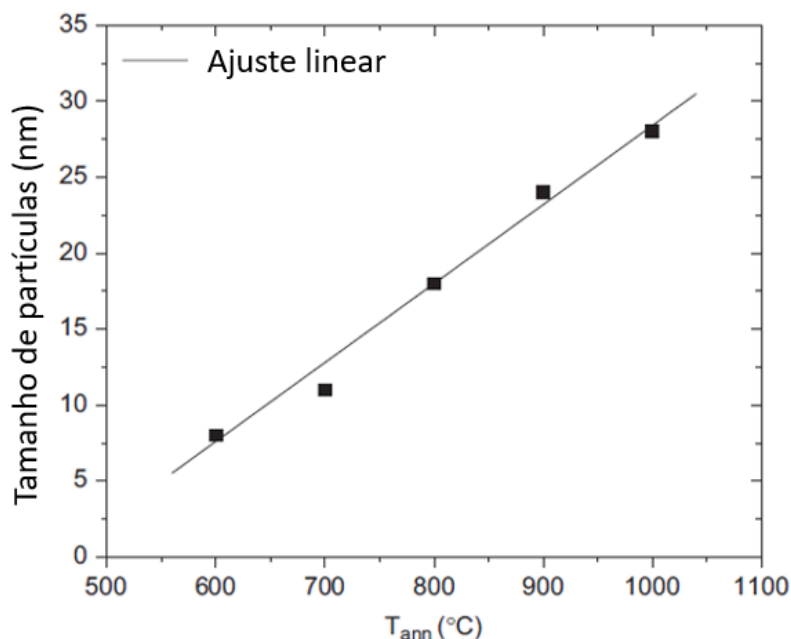
Sendo γ a razão giromagnética da ferrita, medida em MHz/Oe, $4\pi M_s$ a magnetização de saturação do material, medida em Gauss, H_0 a intensidade de campo magnético externo, em Oersted e f a frequência de operação em GHz.

5.1 TÉCNICAS DE FABRICAÇÃO

Diversas técnicas podem ser utilizadas para a fabricação de compostos de ferrita. Cada técnica resulta em características tanto físicas quanto magnéticas específicas, portanto, a escolha da técnica tem sua importância com base nessas características. Entre os métodos destacam-se os métodos sol-gel, co-precipitação e combustão, por serem os processos mais empregados em produção de ferrita.

No método de coprecipitação o cristalito produzido apresenta um tamanho altamente controlado e com uma pouca dispersão (de 5% a 10%), não se fazendo necessário um processo posterior para controle do tamanho das partículas. Maaz et al (2008) apresenta na Figura 27 o controle do tamanho médio das partículas de Ferrita de níquel com a temperatura de sinterização do material, com um comportamento quase linear.

Figura 27 - Relação entre o tamanho das partículas e a temperatura de sinterização.



Fonte: Maaz et al, 2008.

Portanto, nota-se que a técnica de coprecipitação produz soluções homogêneas e com baixa dispersão, que, segundo Silva (2019), são características controladas com base no pH, na temperatura e na concentração de reagentes.

O método de produção por combustão destaca-se pela mistura dos reagentes necessários para composição dos cátions, um combustível e um pouco de água para a formação da solução. Após a mistura, uma fonte externa de calor é aplicada para que se inicie a combustão. (SILVA, 2019)

De acordo com Sorrentino Neto (2016), diversos combustíveis são capazes de realizar a reação. Entre eles pode-se citar ureia, hidrazina, maleica, tetraformol, carboidrazina, e glicina. Devido às diferentes temperaturas de combustão para cada combustível, a reação ocorre de forma diferente para cada escolha, pois a temperatura e o tempo de duração influenciam no tamanho das partículas obtidas.

A fonte externa de calor a ser utilizada pode ser um forno microondas, uma chapa aquecedora ou um forno mufla. Assim como os combustíveis, cada fonte de calor também gera resultados diferentes no produto. (VIEIRA et al, 2012)

A reação de combustão apresenta tempo significativamente curto quando em comparação com a técnica sol-gel, e ainda mais curto em relação ao método de

coprecipitação sendo mais vantajoso com base no tempo de reação e no resultado do cristalito que, conforme Silva (2019) pode ser controlado com base na quantidade de combustível adicionada à reação.

Conforme Braga et al (2014), o interesse no processo sol-gel passou crescer em meados de 1900 após as pesquisas de Ebelman (1846) e Graham (1864), com a observação da hidrólise de tetraortossilicato (TEOS) que, em meio ácido, produziu SiO_2 em forma vítrea. E em 1950, o interesse pela técnica ainda aumentou com a pesquisa de Roy et al (1954) com a síntese de novas cerâmicas com composições de óxido, utilizando materiais como Al, Si, Ti e Zr pelo processo sol-gel.

Conforme Calil (2014), o processo se inicia com a síntese de uma suspensão coloidal de partículas sólidas em um líquido (sol) formando um material de corpo sólido ocupado com um solvente (gel úmido). A remoção do solvente transforma o corpo sólido em um xerogel, se a secagem ocorrer à pressão e temperatura ambiente, ou um aerogel, quando a secagem ocorre acima da pressão e da temperatura críticas.

O termo sol é empregado pela suspensão de partículas coloidais formada no processo, enquanto que o gel é a formação da estrutura rígida formada por essas partículas coloidais. O processo de transição sol-gel define o estabelecimento de diversas ligações entre as moléculas formando uma rede sólida tridimensional. (HIRATSUKA; SANTILLI; PULCINELLI, 1994)

De acordo com Donatti (2013), o método Sol-Gel possui vantagens como:

- Alta homogeneidade dos aerogeis e xerogéis;
- Baixa temperatura de preparação;
- Baixo consumo de energia;
- Possibilidade de preparar materiais com novas composições difíceis de serem preparados por processos convencionais;
- Requer basicamente apenas recipientes de vidro e fornos de baixa temperatura (aproximadamente 1200 °C).

Além disso, ainda conforme Donatti (2013), o método possui também desvantagens como:

- Alto custo da matéria prima;
- Contração do material durante o processo de secagem;
- Manuseio de materiais perigosos à saúde;
- Longo tempo de processamento.

O processo sol-gel executado nesse trabalho é derivado do método Pechini (1967), com a formação de uma solução viscosa com íons metálicos. No método Pechini ocorre a quelatação dos íons metálicos, tornando-se estáveis ao contato com ácido cítrico. Em seguida, o processo de poliesterificação ocorre com a reação com o etilenoglicol, formando assim, uma rede polimérica. (BRAGA et al, 2014)

Em resumo, o ácido cítrico, por possuir três grupos carboxila, proporciona a síntese de polímeros ramificados aleatoriamente, alcançando uma resina de elevada viscosidade. Já o etilenoglicol é responsável por imobilizar a estrutura formada por metal e ácido cítrico.

Ainda segundo Braga et al. (2014), este processo possui vantagens de homogeneidade química, temperatura de calcinação baixas, controle da estequiometria e simplicidade.

5.2 FERRITA DE COBALTO

A ferrita de cobalto é um composto que vem sendo utilizado amplamente por causa de suas características magnéticas. Destacam-se sua alta coercividade e sua moderada magnetização de saturação. Conforme Silva (2017), a ferrita de cobalto é utilizada em FRA em composição com outros elementos, como níquel, em Mohit et al (2013) ou magnésio em Ullah et al (2014).

A estrutura da ferrita de cobalto é uma espinélio inverso, ou seja, os sítios octaédricos são ocupados pelos cátions bivalentes (Co^{2+}) e por metade dos cátions trivalentes (Fe^{3+}), enquanto que a outra metade dos cátions trivalentes situa-se nos sítios tetraédricos.

A técnica utilizada para produção desta ferrita influencia diretamente nas propriedades físicas e magnéticas, assim como o tratamento térmico também utilizado. Naseri et al (2010) mostrou uma diferença no tamanho das nanopartículas de ferrita e na sua distribuição com base em diferentes técnicas de fabricação, assim como Houshiar et al (2014), que analisou os tamanhos das partículas de ferrita de cobalto produzidos pelas técnicas de combustão, coprecipitação e precipitação.

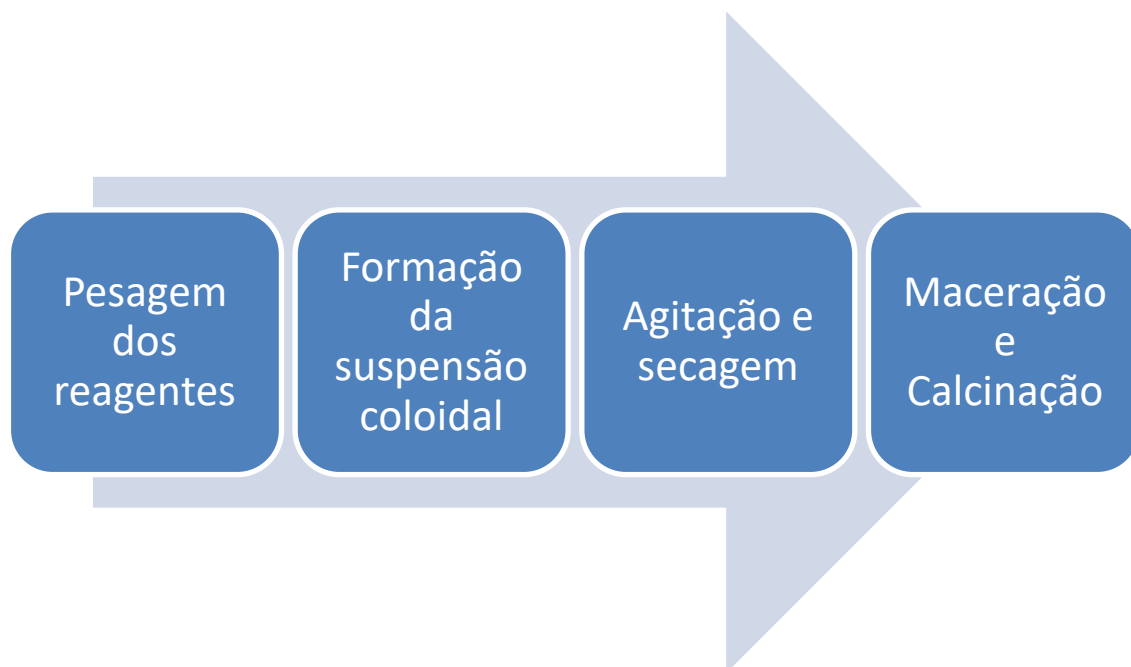
6 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção serão descritos os métodos utilizados para realização dos objetivos propostos para esse trabalho. Os métodos abrangem desde a produção da ferrita até a sua caracterização e os testes com a DRA, além da medição das antenas.

6.1 FABRICAÇÃO DA FERRITA

Neste trabalho foi proposta a fabricação de amostras de Ferrita de Cobalto (CoFe_2O_4) pelo método Sol-Gel. Este método baseia-se na formação de uma suspensão coloidal e na sua transformação em uma rede polimérica (gel). Esse processo é realizado por meio da reação química dos compostos que contém os íons metálicos desejados para o produto final. No caso deste trabalho, cobalto e ferro. Os reagentes utilizados são o Nitrato de Cobalto ($\text{Co}(\text{NO}_3)_2$) e o Nitrato de Ferro ($\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$). A Figura 28 mostra os passos a ser seguidos no processo Sol-Gel.

Figura 28 - Etapas do processo Sol-Gel.



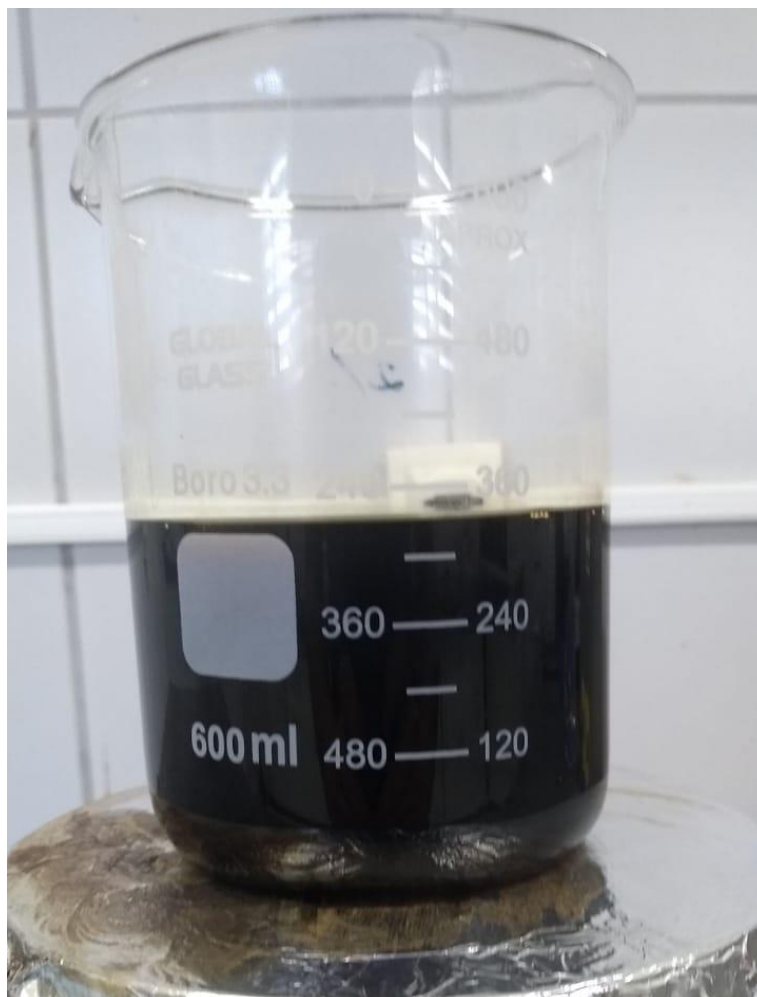
Fonte: Autoria Própria, 2020.

Inicialmente, a pesagem dos reagentes é realizada para começar o processo, com base na estequiometria realizada na seção 6.2.

A reação ocorre em meio ácido, sendo possível com a adição do ácido cítrico ($C_6H_8O_7$) e a formação da rede polimérica é formada devido à adição do etilenoglicol ($C_2H_6O_2$). O ácido cítrico é responsável por abaixar o pH da solução para permitir a reação dos nitratos na solução aquosa, ao mesmo tempo que o etilenoglicol permite o agrupamento das partículas formando assim a rede tridimensional chamada de gel.

A solução formada pela adição dos nitratos de Cobalto e de Ferro, além do ácido cítrico e o etilenoglicol foi posta no agitador magnético com aquecimento por 24 horas a 120 °C, para a homogeneização e secagem da mistura. A Figura 29 ilustra o processo de formação da suspensão coloidal e a reação em meio ácido no agitador da marca LUCADEMA.

Figura 29 - Formação da suspensão coloidal e reação dos íons metálicos.



Fonte: Autoria Própria, 2020.

O gel formado pode ser visto após a secagem da solução ácida como a rede tridimensional condensada, assim como mostra a Figura 30.

Figura 30 - Material obtido após secagem.



Fonte: Autoria Própria, 2020.

O processo de calcinação consiste na queima ou aquecimento de uma mistura com o objetivo de remover de material orgânico da amostra produzida. O procedimento foi executado no forno do tipo mufla a 400 °C durante 6 horas, com uma taxa de crescimento de temperatura de 5 °C/min. O forno utilizado no processo é da marca JUNG com possibilidade de alcançar 1300 °C.

Após a calcinação iniciou-se os métodos referentes à metalurgia do pó. A Figura 31 apresenta o produto obtido após o processo de calcinação.

Figura 31 – Produto obtido após a calcinação da ferrita de cobalto (CoFe_2O_4).



Fonte: Autoria Própria, 2020.

6.2 ESTEQUIOMETRIA

Nessa seção são mostrados os cálculos realizados da estequiometria para a reação dos íons metálicos objetivando a formação da suspensão coloidal de ferrita de cobalto, característica do processo Sol-Gel. Os reagentes utilizados para a reação foram: Nitrato de Cobalto $\text{Co}(\text{NO}_3)_2$, Nitrato de Ferro $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$, Etilenoglicol ($\text{C}_2\text{H}_6\text{O}_2$) e Ácido Cítrico ($\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$).

Inicialmente, calcula-se as proporções de massa dos metais utilizados no produto final, e depois calcula-se a quantidade de reagente utilizado no processo. As massas atômicas dos reagentes podem ser obtidas por meio dos átomos que os constituem. A Tabela 1 mostra a massa dos átomos que compõem os reagentes.

Tabela 2 – Massa Atômica dos Elementos que compõem os reagentes.

Elemento	Massa Atômica (g/mol)
Cobalto (Co)	58,93
Ferro (Fe)	55,85
Oxigênio (O)	16,00
Nitrogênio (N)	14,01
Carbono (C)	12,01
Hidrogênio (H)	1,01

Fonte: Autoria Própria, 2020.

Com base nas massas atômicas dos elementos mostrada na Tabela 1, pode-se calcular também a massa atômica dos reagentes, além da ferrita de cobalto. A Tabela 2 apresenta os dados de massas atômicas desses compostos.

Tabela 3 – Massa atômica dos reagentes e da Ferrita de Cobalto

Composto	Massa Atômica (g/mol)
Nitrato de Cobalto $\text{Co}(\text{NO}_3)_2$	291,035
Nitrato de Ferro $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$	404,00
Etilenoglicol ($\text{C}_2\text{H}_6\text{O}_2$)	62,07
Ácido Cítrico ($\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$)	210,14
Ferrita de cobalto (CoFe_2O_4)	234,63

Fonte: Autoria Própria, 2020.

O cálculo realizado da proporção para a quantidade de reagentes é feita com base nas massas atômicas dos elementos e dos próprios reagentes. Para cada mol de Ferrita de cobalto, se faz necessário 58,93 gramas de Cobalto, 111,70 gramas de Ferro e 64,00 gramas de Oxigênio. Para obter a proporção da quantidade desses elementos dentro do produto final, calcula-se:

$$\begin{array}{rcl}
 58,93 \rightarrow 234,63 & & 111,70 \rightarrow 234,63 \\
 M_{\text{Co}} \leftarrow 1g & & M_{\text{Fe}} \leftarrow 1g \\
 \hline
 M_{\text{Co}} = 0,251 g & & M_{\text{Fe}} = 0,476 g
 \end{array}$$

A quantidade de reagente necessário para manter a proporção calculada também pode ser obtido por meio do mesmo cálculo.

$$\begin{array}{rcl}
 291,035 \rightarrow 58,93 & & 404,00 \rightarrow 111,70 \\
 M_{Co(NO_3)_2} \leftarrow 0,251g & & M_{Fe(NO_3)_3} \leftarrow 0,476g \\
 \hline
 M_{Co(NO_3)_2} = 1,24 \text{ g} & & M_{Fe(NO_3)_3} = 3,45 \text{ g}
 \end{array}$$

Conforme Castro (2018), a quantidade de ácido cítrico é de 1,5 da sua massa atômica (315,28 g/mol), objetivando tornar o meio ácido o suficiente para que ocorra a formação da suspensão. A massa demandada é calculada com base na quantidade requerida de Cobalto e Ferro somadas.

$$\begin{array}{rcl}
 315,28 \rightarrow 58,93 & & 315,28 \rightarrow 111,70 \\
 M_{C_6H_8O_7} \leftarrow 0,251g & & M_{C_6H_8O_7} \leftarrow 0,476g \\
 \hline
 M_{C_6H_8O_7} = 1,343 \text{ g} & & M_{C_6H_8O_7} = 2,65 \text{ g}
 \end{array}$$

Assim, se faz necessário 4g de Ácido cítrico para a reação. E a proporção de ácido cítrico e etilenoglicol utilizada na reação é de 60:40. Assim, as quantidades de reagentes necessários para a produção de 1g de Ferrita de Cobalto pelo método Sol-Gel são mostradas na Tabela 3.

Tabela 4 – Quantidade necessária de reagentes para produzir 1g de Ferrita de Cobalto.

Composto	Massa Demandada (g)
Nitrato de Cobalto $Co(NO_3)_2$	1,24
Nitrato de Ferro $Fe(NO_3)_3$	3,45
Etilenoglicol ($C_2H_6O_2$)	2,67
Ácido Cítrico ($C_6H_8O_7$)	4,00

Fonte: Autoria Própria, 2020.

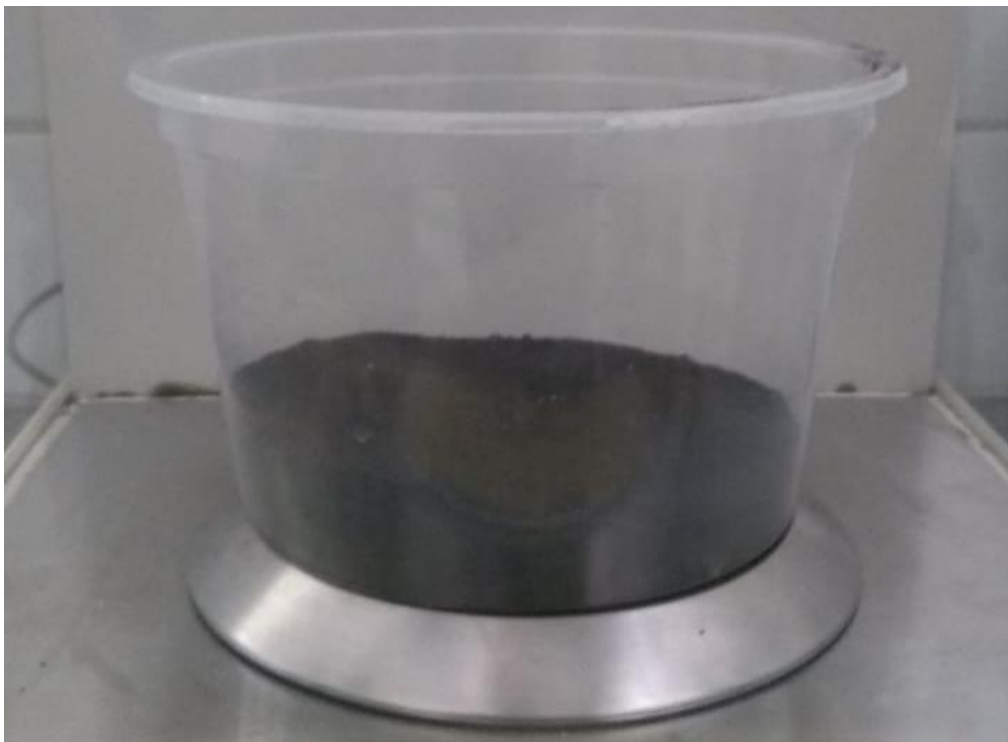
Como o etilenoglicol é um reagente líquido, utiliza-se sua densidade ($1,11g/cm^3$) para calcular o volume necessário desse reagente. Com base nisso, observa-se que a quantidade de etilenoglicol demandada é de 2,42 ml.

6.3 METALURGIA DO PÓ

Para produção de estruturas com materiais, a metalurgia do pó torna-se uma boa alternativa, por alcançar um produto final de qualidade, com base em algumas características do material, como tamanho das partículas e porosidade. As etapas realizadas num processo metalúrgico do pó são: a obtenção do pó, compactação, sinterização e, se necessário, algum procedimento complementar. (MORAIS, 2012)

No primeiro passo, a obtenção do pó é feita por meio de maceração do material obtido anteriormente com a calcinação. Consiste basicamente na moagem do material sólido obtido. A Figura 32 apresenta o produto obtido da maceração.

Figura 32 – Pó de ferrita de cobalto (CoFe_2O_4) obtido com a maceração do material calcinado.



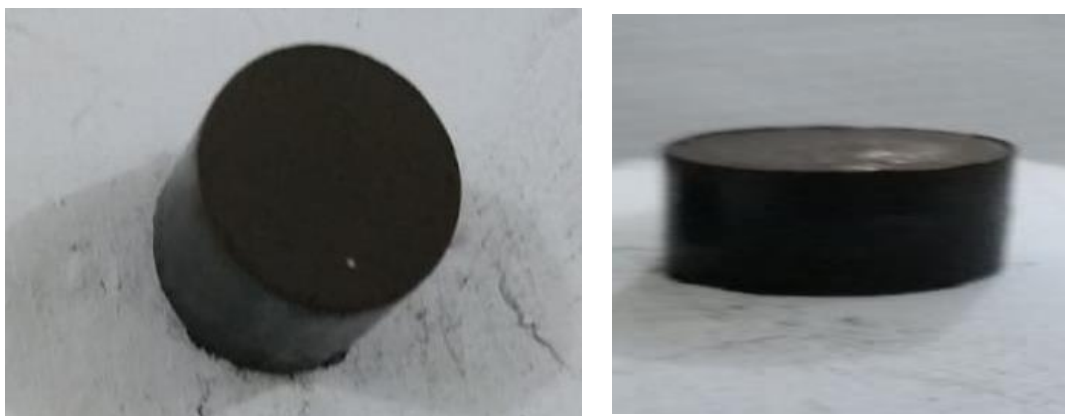
Fonte: Autoria Própria, 2020.

Em seguida é feita a compactação do pó, que consiste na formação do produto em um formato desejado. A compactação, ou compressão é realizada com um pastilhador (ou matriz) com a geometria esperada. As geometrias mais simples capazes de ser produzidas com um pastilhador são retangulares e cilíndricas, sendo o formato

cilíndrico mais comum por causa da dificuldade de controlar a pressão aplicada nos vértices do paralelepípedo formado no pastilhador de seção retangular. Ainda, os pastilhadores cilíndricos possuem o mesmo grau de liberdade que os pastilhadores retangulares, podendo variar apenas a altura da peça formada, com as outras dimensões limitadas às dimensões do pastilhador.

Nesse trabalho, é proposto um DRA de formato cilíndrico, ou seja, se faz necessário um pastilhador com geometria interna cilíndrica. O diâmetro da peça se limita ao diâmetro interno do equipamento utilizado, portanto, um dos graus de liberdade do formato cilíndrico se faz fixo por causa de seu processo de fabricação. O material compactado utilizando um pastilhador cilíndrico é ilustrado na Figura 33.

Figura 33 – Material compactado em forma cilíndrica.



Fonte: Autoria Própria, 2020.

Foi também utilizado um pastilhador cilíndrico com um eixo circular em seu centro, próprio para a fabricação de toroides. Os toroides foram utilizados para realização da medição de permeabilidade magnética relativa. Assim como o pastilhador cilíndrico, os diâmetros interno e externo da pastilha limitam-se ao diâmetro do eixo e o diâmetro interno da matriz, respectivamente. Assim, apenas a altura da pastilha pode ser controlada. A Figura 34 apresenta um toroide formado pelo pastilhador cilíndrico.

Figura 34 – Material compactado em formato toroidal.



Fonte: Autoria Própria, 2020.

A produção das pastilhas de Ferrita de Cobalto (FeCo_2O_4) pôde ser iniciada logo após a obtenção do pó de ferrita. As etapas de metalurgia do pó (apresentadas na seção 6.3) foram aplicadas na fabricação de amostras nos formatos cilíndricos e toroidais.

O processo inicial de pesagem do material levou em conta a quantidade de amostras a serem produzidas. Assim, foram separados 40g de pó de Ferrita de Cobalto para a fabricação de duas pastilhas cilíndricas e três pastilhas toroidais com dimensões baseadas nos pastilhadores utilizados. O pastilhador cilíndrico possuía um diâmetro de 13mm e o pastilhador toroidal apresentava diâmetro total de 15 mm e diâmetro do eixo interno de 7 mm. As Figuras 35 e 36 mostram os pastilhadores para prensagem do pó.

Figura 35 – Matrizes utilizadas para prensagem das pastilhas cilíndricas.



Fonte: Autoria Própria, 2020.

Figura 36 – Matrizes utilizadas para prensagem das pastilhas toroidais.



Fonte: Autoria Própria, 2020.

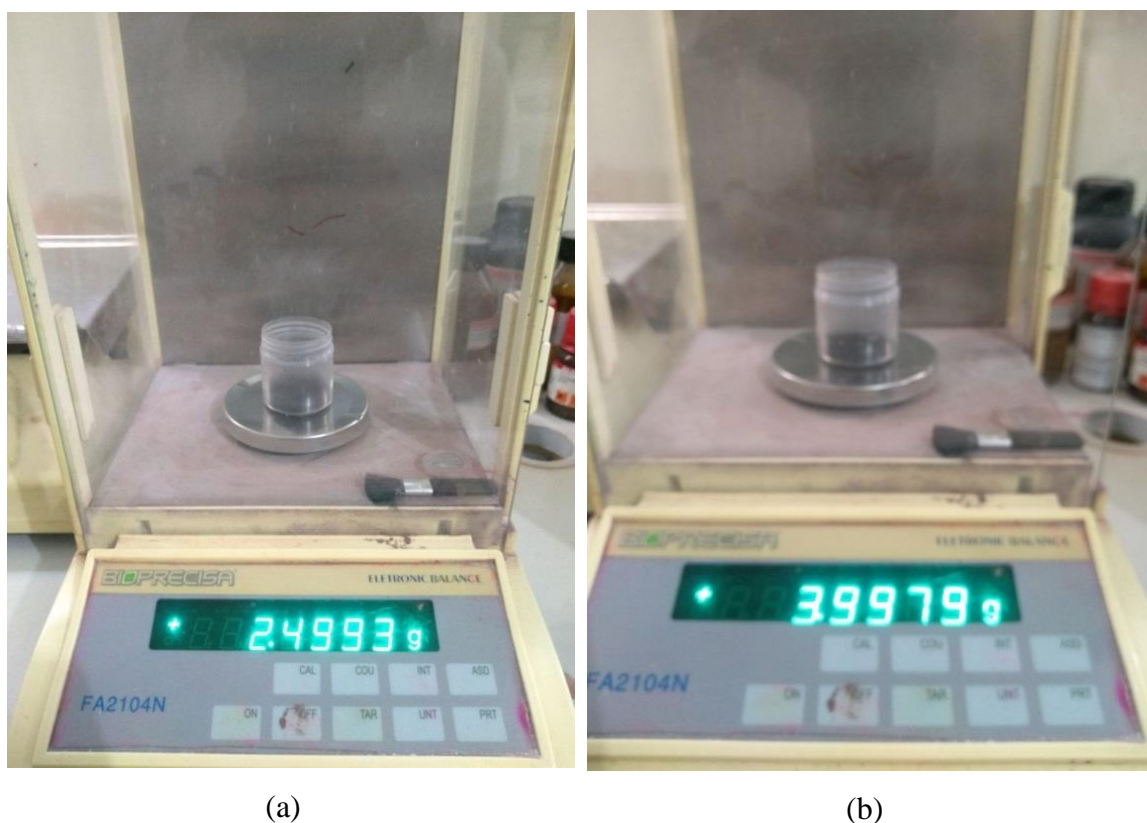
Antes do processo de prensagem, foi adicionado ao material 20 gotas (aproximadamente 1 mL) de Acetato de Polivinila (PVA) para atuar como agente

aglutinante, com o intuito de manter a estrutura da pastilha mais fixa e facilitar a remoção do material da matriz.

Para utilização no método de Hakki Coleman, buscou-se uma pastilha com uma razão raio-altura de aproximadamente 1:1, pois essa relação facilitava a análise no método. Portanto, fez-se necessário um cilindro prensado de altura $h = 6,5$ mm. Para os toróides, buscou-se uma altura de $h = 5$ mm.

Por meio da balança de precisão BIOPRECISA FA2104N, foram pesados 2,5 gramas para cada amostra cilíndrica e 4,0 gramas para cada amostra toroidal, incluindo a adição de PVA ao pó. As massas apresentadas foram estimadas por meio de tentativas de alcançar as alturas mostradas anteriormente. A Figura 37 apresenta a medição das massas de pó de Ferrita de Cobalto para os dois tipos de amostra.

Figura 37 - Medição das massas de Ferrita de Cobalto para prensagem das pastilhas cilíndricas (a) e toroidais (b).



Fonte: Autoria Própria, 2020.

No processo de prensagem foram utilizadas as matrizes comentadas anteriormente e uma prensa hidráulica uniaxial. Foram aplicadas 2 toneladas para cada

amostra durante um período de 5 minutos. A Figura 38 exibe o processo de prensagem das peças na prensa hidráulica.

Figura 38 - Prensagem das peças na prensa hidráulica (a) com 2 toneladas aplicadas (b).



(a)

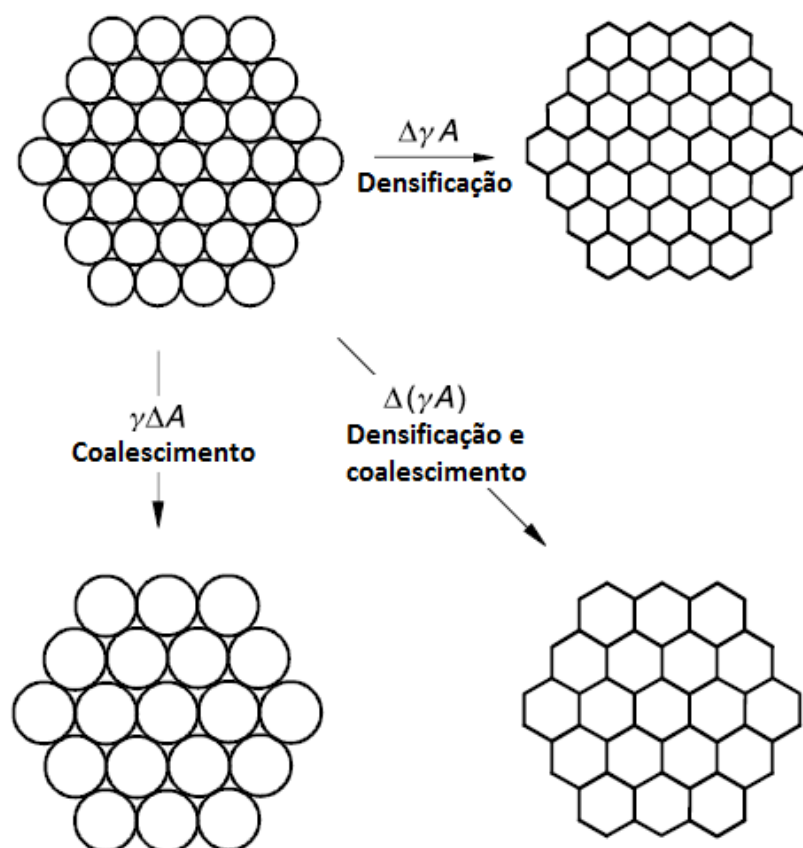


(b)

Fonte: Autoria Própria, 2020.

A etapa final do processo de metalurgia do pó é a sinterização. Esta etapa consiste no aquecimento da pastilha compactada objetivando o coalescimento dos grãos e a densificação do material compactado. Segundo Kang (2005), este processo difere-se da fundição, pois neste último, o material torna-se líquido e endurece após o resfriamento, enquanto que na sinterização os grãos se unem por meio do fornecimento de calor. A Figura 39 mostra o exemplo de junção das partículas nesse processo.

Figura 39 - Coalescência e densificação do cristalito no processo de sinterização.



Fonte: Adaptado de: Kang (2005).

Para este trabalho, a sinterização ocorreu a 1200 °C durante 6 horas no forno do tipo mufla da marca JUNG, com uma taxa de crescimento de 5 °C/min.

6.4 CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL

O processo de caracterização consiste na determinação das características de um material, tanto estruturais como elétricas e magnéticas. Este processo tem muita importância para verificar o comportamento do material em determinadas aplicações. As características verificadas, como tamanho das partículas, morfologia, cristalografia além de características elétricas e magnéticas são importantes para o desempenho do material em substratos ou em ressoadores dielétricos.

Para a caracterização estrutural do material produzido são utilizadas as técnicas de Difração por Raios X (DRX) e Microscopia Eletrônica por Varredura (MEV). Já para

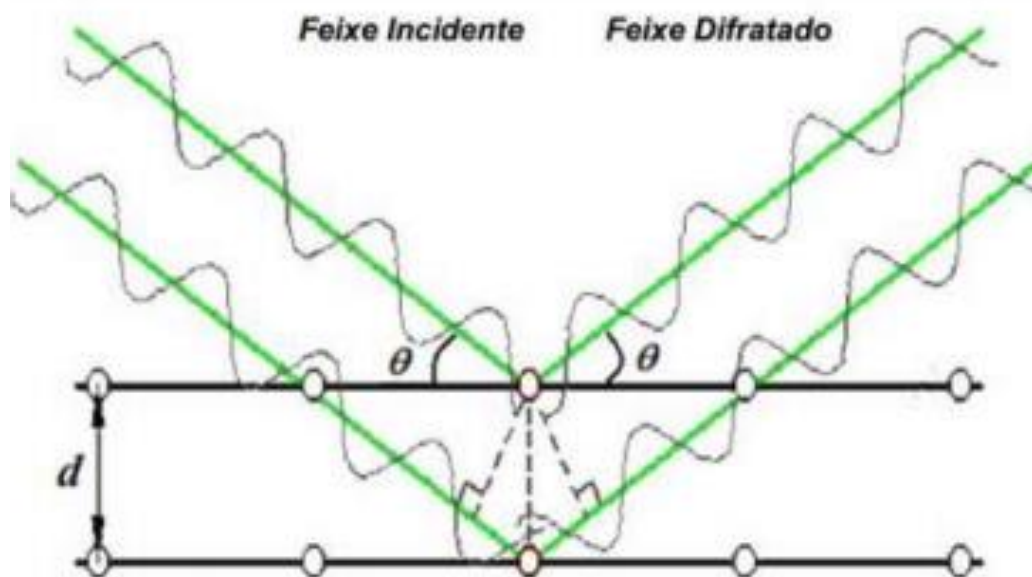
a caracterização eletromagnética foram utilizados o método de Hakki e Coleman e o método da indutância.

6.4.1 Difração por Raios X (DRX)

O procedimento de Difração por Raios X tem como base os estudos do físico alemão Wilhelm Conrad Röntgen em 1895, com a evidência da existência de raios X (OLIVEIRA, 2011). Mais tarde, Bragg observou o fenômeno de difração desses raios X, que, refletidos de metais cristalinos possuíam comprimentos de onda específicos e picos de radiação de acordo com um ângulo de incidência dos raios definida. (PINHEIRO, 2015)

O princípio do método é a incidência de raios X numa amostra em direções determinadas e a observação dos raios difratados, como mostra a Figura 40. Faz-se necessário um anteparo metálico, geralmente de cobre, para a reflexão dos raios difratados.

Figura 40 – Representação da difração de raios X.



Fonte: Almeida Filho, 2010.

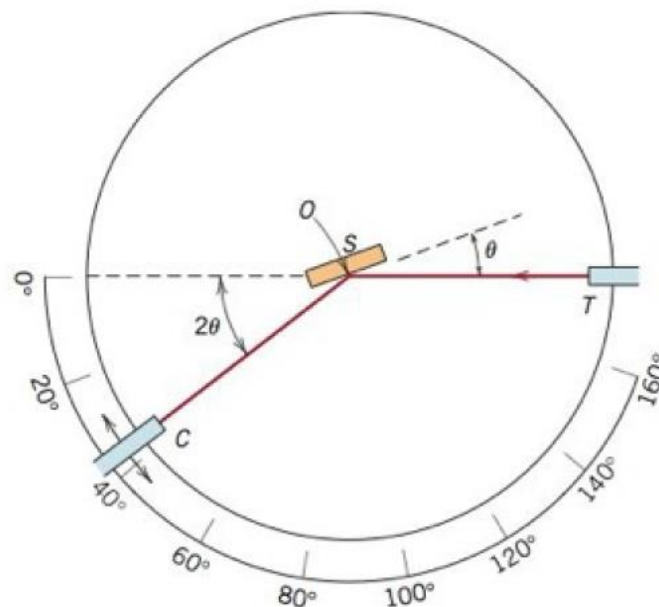
O fenômeno baseia-se na Lei de Bragg, que relaciona o comprimento de onda dos raios-X, o ângulo de incidência destes raios e as distâncias entre as partículas. (CALLISTER, 2008) A Equação 54 apresenta a lei de Bragg, com λ sendo o

comprimento de onda dos raios-X, d a distância entre as partículas e θ o ângulo de incidência do feixe.

$$n\lambda = 2d \times \sin \theta \quad (54)$$

O equipamento responsável pelo processo se chama difratômetro de raios X. Nele é inserida a amostra, que será rotacionada em um ângulo θ e o detector dos raios refletidos rotaciona 2θ . A Figura 41 ilustra a estrutura básica de um difratômetro de raios X.

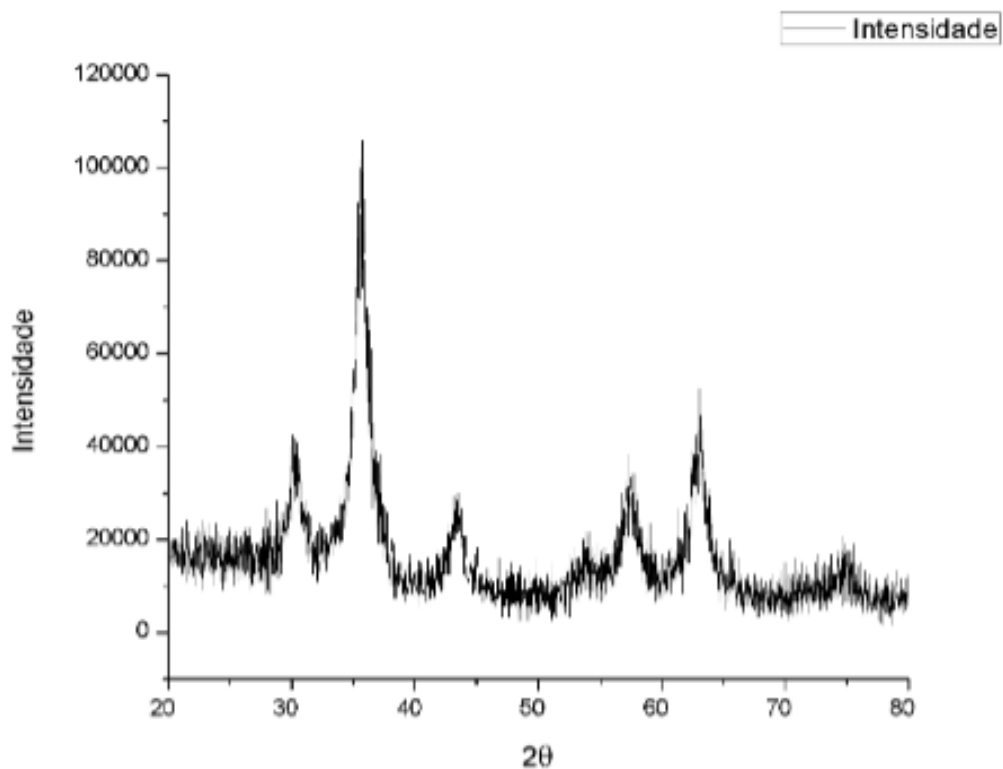
Figura 41 – Estrutura de um difratômetro de raios X.



Fonte: Silva, 2019.

O esquema de difratômetro representado na Figura 37 ilustra a amostra de material no centro do esquema, representado pela letra S, que recebe o feixe de raios X diretamente da fonte T, difratando-o. O anteparo na parte posterior da amostra reflete o feixe para o dispositivo C responsável pela recepção dos raios X.

O teste de difração de raios X resulta num gráfico denominado difratograma, e desse, pode-se observar os picos de radiação de acordo com o ângulo 2θ . É feita a comparação do difratograma obtido no teste com o difratograma característico do material. A Figura 42 apresenta um exemplo de difratograma medido em um difratômetro de raios X para o material ferrita de cobalto em Gurgel (2017).

Figura 42 – Difratoograma medido da ferrita de cobalto (CoFe_2O_4).

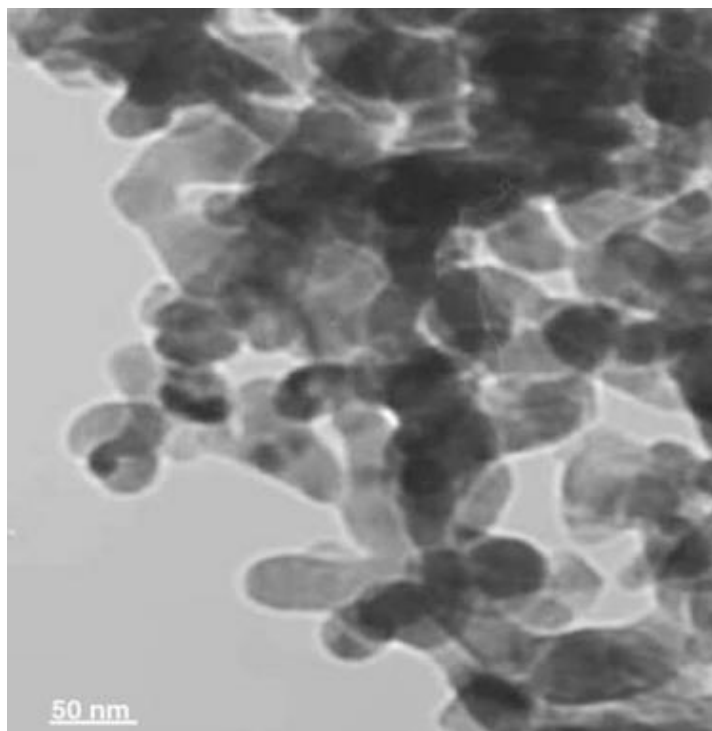
Fonte: Gurgel, 2017.

6.4.2 Microscopia Eletrônica por Varredura (MEV)

O método de Microscopia Eletrônica por Varredura (MEV) é utilizada para observação da estrutura do material produzido. O princípio básico desse processo é a incidência de um feixe de elétrons na amostra, que será refletido e coletado, mostrando uma imagem produzida pela reflexão do feixe.

O resultado do procedimento apresenta o tamanho das partículas, além da ampliação da imagem, tensão de aceleração e distância de trabalho (SILVA, 2019). A Figura 43 apresenta um exemplo de MEV para o material ferrita de cobalto.

Figura 43 – Microscopia Eletrônica por Varredura da ferrita de cobalto (CoFe_2O_4).



Fonte: Sagadevan, Podder e Das, 2017.

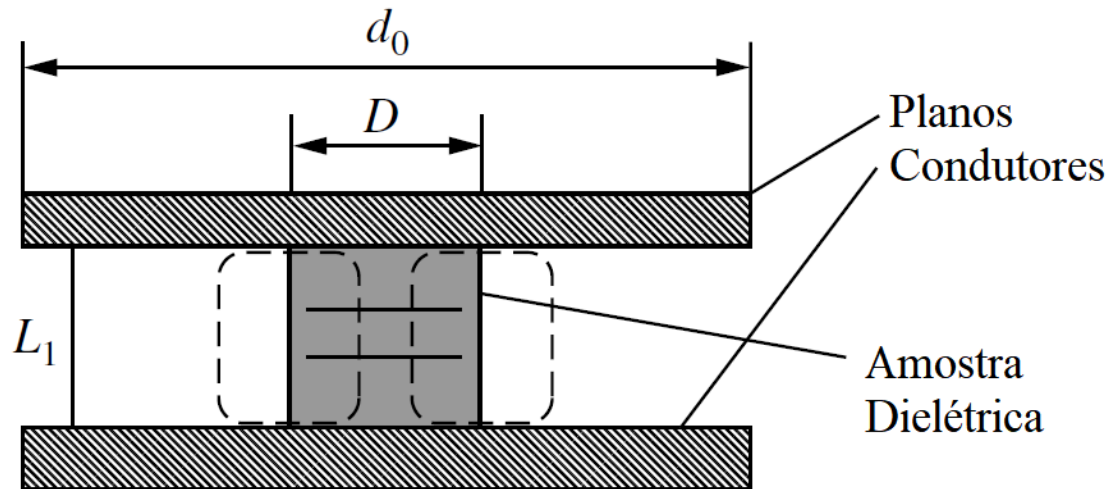
6.4.3 Hakki-Coleman

O método de Hakki-Coleman foi primeiramente descrito em 1960 e mais tarde foi mais profundamente analisado e desenvolvido por Courtney em 1970. Assim, esse método também pode ser chamado de método Courtney.

O princípio desta técnica consiste em excitar um dos métodos fundamentais de propagação de ondas em uma amostra ressoadora e analisar o armazenamento de energia nesta amostra.

A estrutura de medição é basicamente um guia de ondas dielétrico curto circuitado. O guia é formado por uma amostra dielétrica cilíndrica limitada em suas faces planas por planos condutores, que são considerados infinitamente compridos. A Figura 44 apresenta a estrutura utilizada no método.

Figura 44 – Estrutura de medição do método Hakki Coleman.



Fonte: Adaptado de Chen et al, 2004.

Conforme Silva (2009), placas finitas ainda podem fornecer um resultado considerável pelo fato de os campos fora da amostra ressoadora decaírem rapidamente com a distância.

A equação característica para os modos normais é apresentada na Equação 55.

$$\left[\frac{\epsilon_r J'_m(\alpha)}{\alpha J_m(\alpha)} + \frac{K'_m(\beta)}{\beta K_m(\beta)} \right] \left[\frac{J'_m(\alpha)}{\alpha J_m(\alpha)} + \frac{K'_m(\beta)}{\beta K_m(\beta)} \right] = m^2 \left[\frac{\epsilon_r}{\alpha^2} + \frac{1}{\beta^2} \right] \left[\frac{1}{\alpha^2} + \frac{1}{\beta^2} \right] \quad (55)$$

$$\alpha = \frac{\pi D}{\lambda} \left[\epsilon_r - \left(\frac{l\lambda}{2L} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (56)$$

$$\beta = \frac{\pi D}{\lambda} \left[\left(\frac{l\lambda}{2L} \right)^2 - 1 \right]^{1/2} \quad (57)$$

Onde $J_m(\alpha)$ e $K_m(\beta)$ são funções de Bessel de primeira e segunda ordem respectivamente, D e L são o diâmetro e a altura da amostra cilíndrica respectivamente e l corresponde a múltiplos de meio comprimento de onda, com $l = 1, 2, 3, \dots$

A análise é feita para o modo TE_{011} por ser amplamente utilizado em caracterização de materiais, pois nesse modo não há corrente elétrica sendo conduzida no dielétrico e nas placas condutoras. Assim, para o modo TE_{011} a relação entre α e β pode ser dada pela Equação 58.

$$\varepsilon_r = 1,0 + \left(\frac{c}{\pi D f_1}\right)^2 (\alpha_1^2 + \beta_1^2) \quad (58)$$

Onde α_1 e β_1 são as primeiras raízes características das Equações 56 e 57 com $m = 0$ e $l = 1$ e f_1 igual à frequência de ressonância. A tangente de perdas também pode ser calculada. A Equação 59 apresenta o cálculo realizado para o cálculo das perdas da amostra.

$$\tan \delta = \frac{A}{Q_0} - BR_S \quad (59)$$

Onde:

$$A = 1 + \frac{W}{\varepsilon_r} \quad (60)$$

$$B = \left(\frac{l\lambda}{2L}\right)^3 \frac{1 + W}{30 \pi^2 \varepsilon_r l} \quad (61)$$

$$W = \frac{J_1^2(\alpha_1)}{K_1^2(\beta_1)} \times \frac{K_0(\beta_1)K_2(\beta_1) - K_1^2(\beta_1)}{J_1^2(\alpha_1) - J_0(\alpha_1)J_2(\alpha_1)} \quad (62)$$

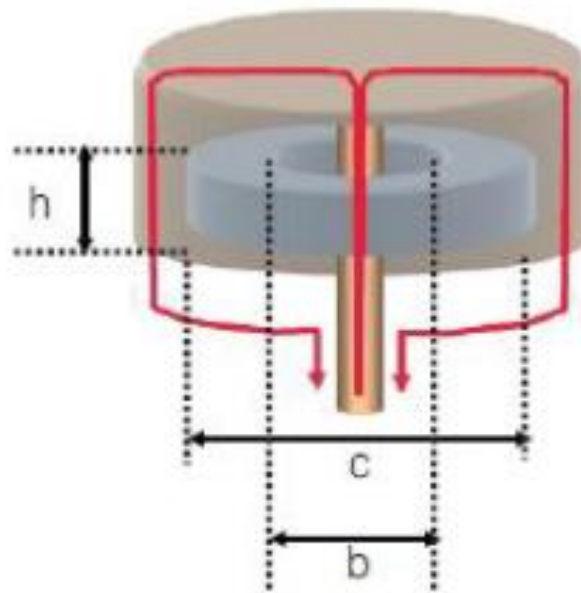
$$R_S = \sqrt{\frac{\pi f_1 \mu}{\sigma}} \quad (63)$$

Onde σ é a condutividade do plano condutor, Q_0 é o fator de qualidade do ressoador dielétrico e W é a razão entre a energia relacionada aos campos elétricos estocada fora e dentro da amostra. Assim, a tangente de perdas pode ser calculada com base na frequência de ressonância, o fator de qualidade e as dimensões da amostra.

6.4.4 Método da indutância

Esta técnica é utilizada para realização da medição de permeabilidade magnética. Conforme Silva (2019), a relação entre a indutância medida com a amostra e sem a amostra é o princípio utilizado para o método. O requisito para realização da medição é que a amostra seja de formato toroidal, assim como mostra a Figura 45.

Figura 45 – Estrutura utilizada para medição de permeabilidade magnética.



Fonte: K. Technologies, 2017.

A equação característica para calcular a permeabilidade magnética relativa é mostrada na Equação 64.

$$\mu_r = \frac{L_S - L_C}{\mu_0} \frac{2\pi}{h \ln\left(\frac{c}{b}\right)} \quad (64)$$

Onde h, b e c são a altura, o raio interno e o raio externo da amostra respectivamente e L_S e L_C são as indutâncias medidas sem a amostra e com a amostra respectivamente.

7 RESULTADOS

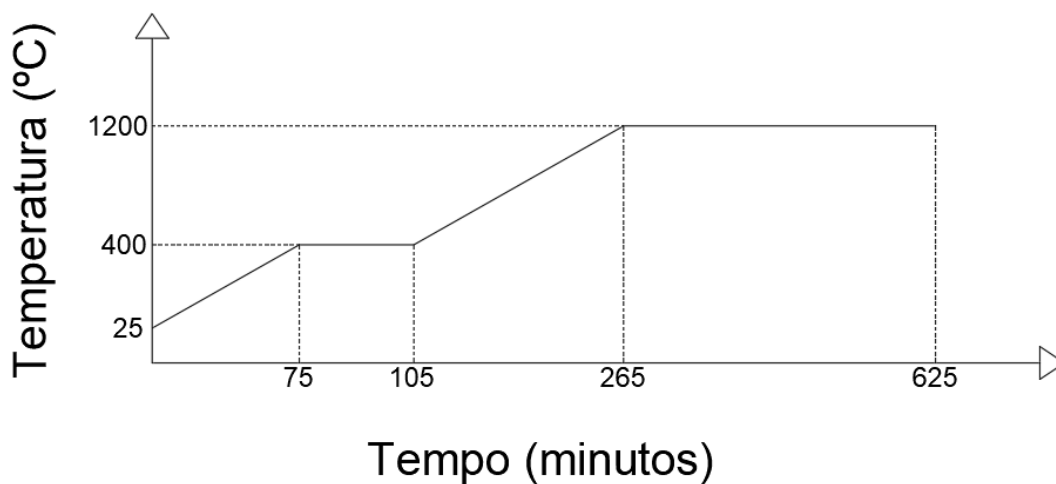
Nesta seção serão apresentados os dados de medição e simulação dos itens mostrados anteriormente, além de discorrer sobre características notadas nessas medições.

7.1 FABRICAÇÃO DAS PASTILHAS

Após esse processo, pôde-se obter as pastilhas compactadas, porém antes de serem levadas ao forno para o processo de sinterização. Este processo foi realizado no forno do tipo mufla da marca JUNG com escala até 1300 °C. A adição do PVA fez com que o procedimento tivesse uma etapa a mais, para a retirada do PVA da estrutura durante a sinterização.

O forno deveria aquecer 5 °C por minuto até atingir os 1200 °C e permanecer nesta temperatura durante 6 horas, porém foi adicionado mais um degrau aos 400 °C durante o aquecimento durante 30 minutos. O gráfico na Figura 46 ilustra melhor a relação entre temperatura do forno e o tempo decorrido.

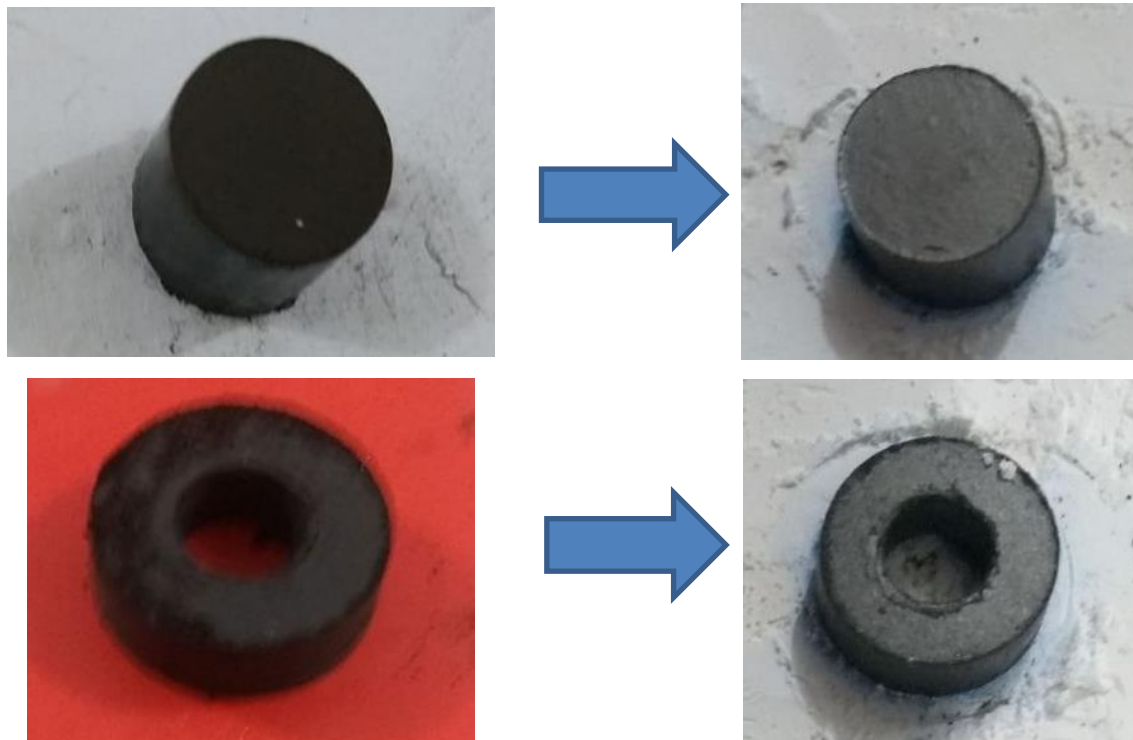
Figura 46 - Temperatura do forno em função do tempo no aquecimento do processo de sinterização.



Fonte: Autoria Própria, 2020.

Finalizando o processo de metalurgia do pó, foram obtidas as pastilhas anteriormente descritas, sendo estas apresentadas na Figura 47.

Figura 47 - Produto resultado da sinterização.



Fonte: Autoria Própria, 2020.

Houve uma diminuição nas dimensões dos materiais prensados, como era esperado. As dimensões das pastilhas foram medidas por meio de um paquímetro digital, com precisão de 0,01 mm. Foram realizadas 5 medidas de cada dimensão das pastilhas para a obtenção do valor médio da medida de cada dimensão. Foi medida também a massa de cada pastilha. Os valores mensurados são mostradas nas Tabelas 5 a 10.

Tabela 5 - Dimensões do cilindro 1.

Cilindro 1	Altura (h)	Diâmetro (D)
Medida 1	5,13	10,05
Medida 2	5,15	10,04
Medida 3	5,14	10,04
Medida 4	5,13	10,05
Medida 5	5,15	10,05
Média	5,14	10,046

Fonte: Autoria Própria, 2020.

Tabela 6 - Dimensões do cilindro 2.

Cilindro 2	Altura (h)	Diâmetro (D)
Medida 1	5,02	10,08
Medida 2	5,02	10,08
Medida 3	5,03	10,08
Medida 4	5,01	10,09
Medida 5	5,02	10,09
Média	5,02	10,084

Fonte: Autoria Própria, 2020.

Tabela 7 - Dimensões do toroide 1.

Toroide 1	Altura (h)	Diâmetro (D)	Diâmetro Interno (d)
Medida 1	4,35	13,76	5,99
Medida 2	4,38	13,75	5,96
Medida 3	4,37	13,73	5,98
Medida 4	4,37	13,77	5,96
Medida 5	4,35	13,77	5,96
Média	4,364	13,756	5,97

Fonte: Autoria Própria, 2020.

Tabela 8 - Dimensões do toroide 2.

Toroide 2	Altura (h)	Diâmetro (D)	Diâmetro Interno (d)
Medida 1	4,51	13,76	5,98
Medida 2	4,52	13,78	5,99
Medida 3	4,51	13,77	5,98
Medida 4	4,51	13,78	5,96
Medida 5	4,51	13,77	5,97
Média	4,512	13,772	5,976

Fonte: Autoria Própria, 2020.

Tabela 9 - Dimensões do toroide 3.

Toroide 3	Altura (h)	Diâmetro (D)	Diâmetro Interno (d)
Medida 1	4,40	13,81	5,95
Medida 2	4,40	13,83	5,96
Medida 3	4,41	13,79	5,97
Medida 4	4,43	13,83	5,95
Medida 5	4,38	13,80	5,96
Média	4,404	13,812	5,958

Fonte: Autoria Própria, 2020.

Tabela 10 - Massas das amostras produzidas.

Amostra	Massa (g)
Cilindro 1	1,9022
Cilindro 2	1,8859
Toroide 1	2,2641
Toroide 2	2,2875
Toroide 3	2,3070

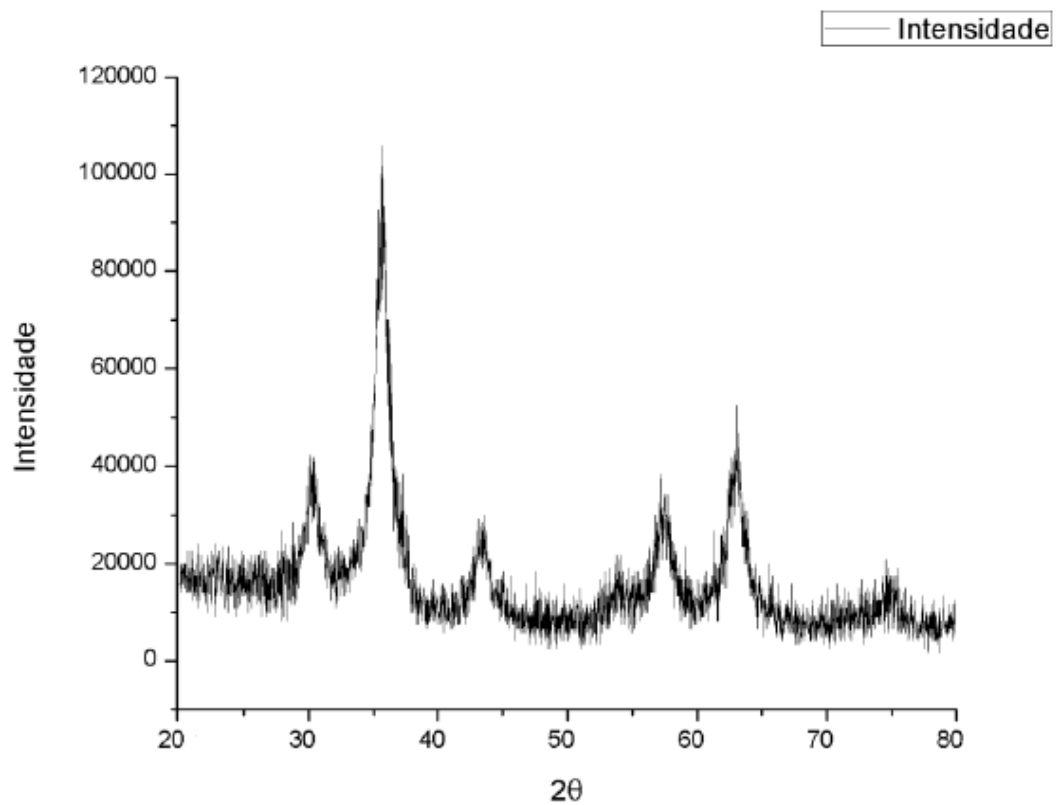
Fonte: Autoria Própria, 2020.

7.2 CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL

7.2.1 Difração de Raios X

O difratograma apresentado em Gurgel (2017) ilustra o difratograma característico da Ferrita de Cobalto. A Figura 48 ilustra a medida no intervalo de $20^\circ < 2\theta < 80^\circ$.

Figura 48 - Difratoograma da Ferrita de Cobalto.

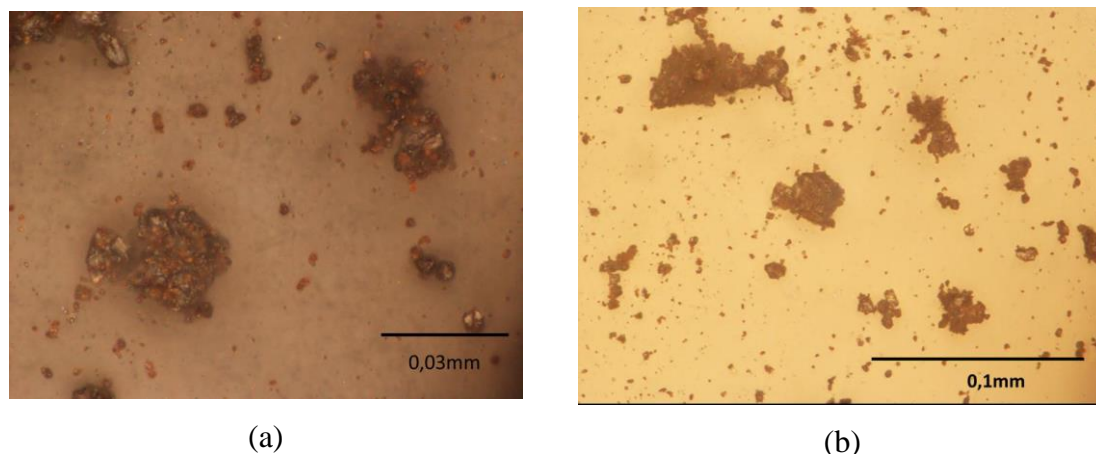


Fonte: Gurgel, 2017.

7.2.2 Microscopia Eletrônica por Varredura

Gurgel (2017) também apresenta o resultado do teste de Microscopia Eletrônica por Varredura, com uma ampliação de 500 vezes e 1000 vezes. A Figura 49 apresentam as imagens retiradas do teste, com a demonstração de algumas massas agregadas do material.

Figura 49 - Microscopia Eletrônica por varredura de amostras de Ferrita de Cobalto (CoFe_2O_4)



Fonte:Gurgel, 2017.

7.2.3 Permeabilidade Magnética

A medição de permeabilidade magnética tornou-se possível por meio do Analisador de Impedância da marca Agilent modelo E4991A. Foram realizadas as medidas de permeabilidade magnética (μ') e permeabilidade magnética imaginária (μ'') para cada toroide na faixa de 1 MHz a 3 GHz. A Figura 50 apresenta o analisador de impedância utilizado para a medição de permeabilidade magnética.

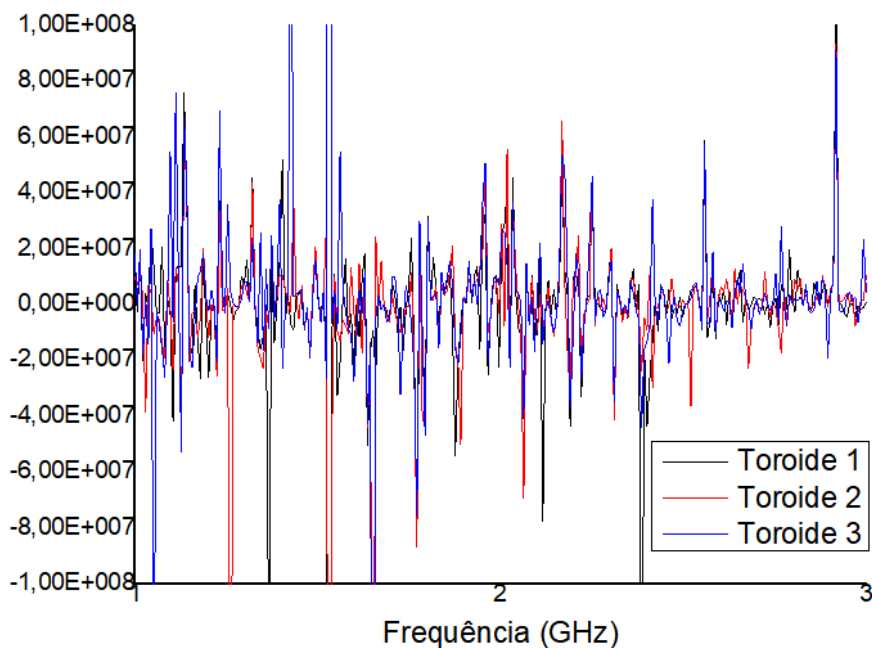
Figura 50 - Analisador de Impedância Agilent E4991A.



Fonte: Autoria Própria, 2020.

Os gráficos na Figura 51 ilustra a medida de μ_r' para os toroides 1, 2 e 3.

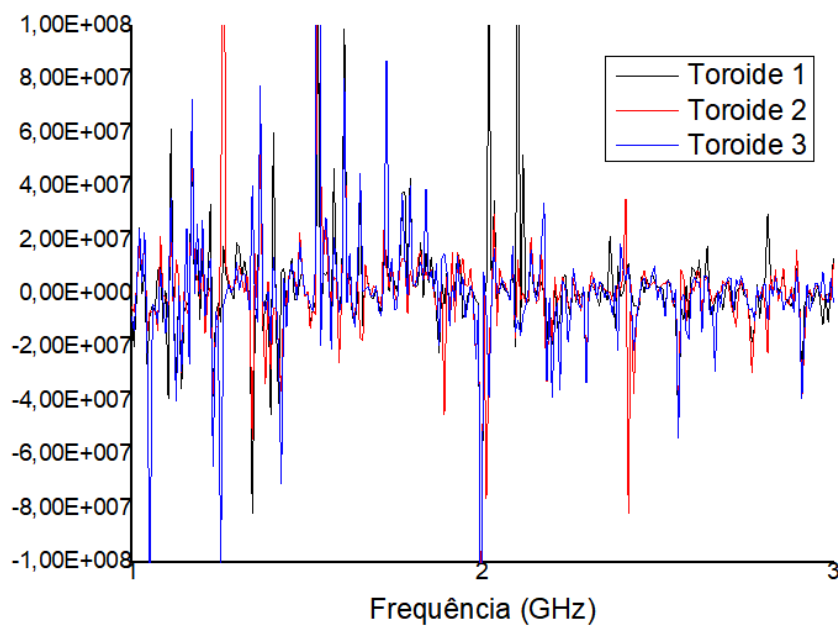
Figura 51 - Medida de permeabilidade magnética nos toroides.



Fonte: Autoria Própria, 2020.

Logo abaixo, nas Figuras 52, tem-se ilustradas as medidas de μ_r'' para as amostras toroidais 1, 2 e 3.

Figura 52 - Medição de μ_r'' nos toroides.

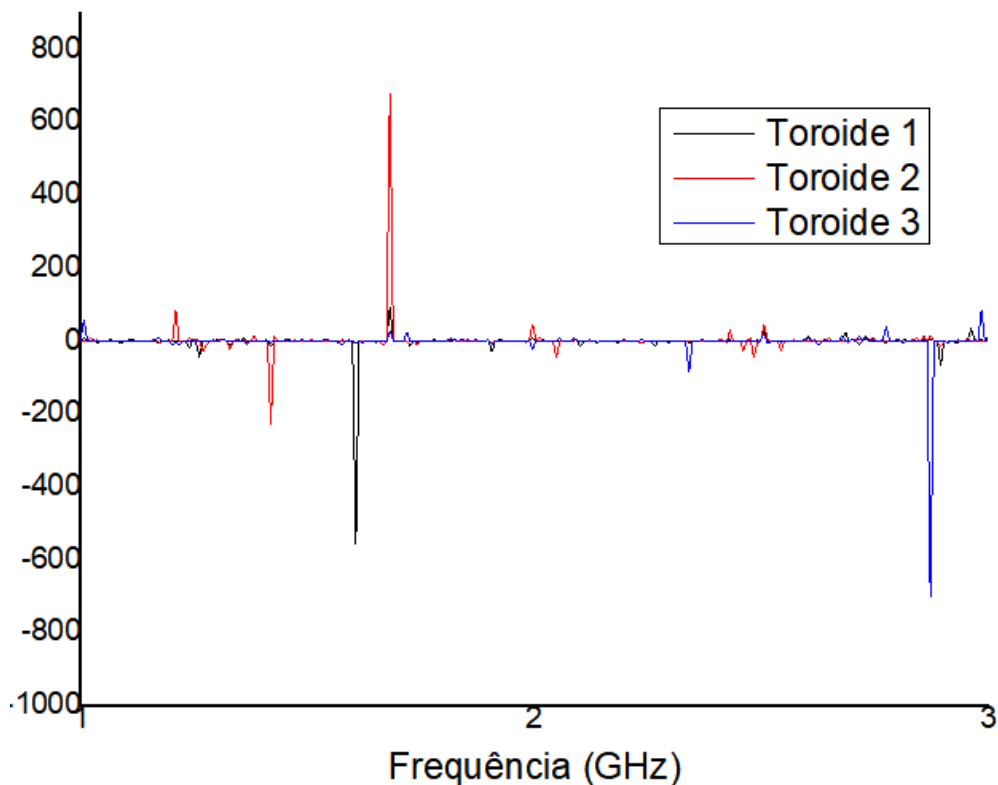


Fonte: Autoria Própria, 2020.

De posse dos valores de μ_r' e μ_r'' é possível calcular os valores de tangente de perdas magnéticas para cada amostra, por meio da Equação 65. As Figuras 57, 58 e 59 apresentam a tangente de perdas magnéticas medidas para os toroides 1, 2 e 3.

$$\tan \delta = \frac{\mu''}{\mu'} \quad (65)$$

Figura 53 - Tangente de perdas magnética medida nos toroides.



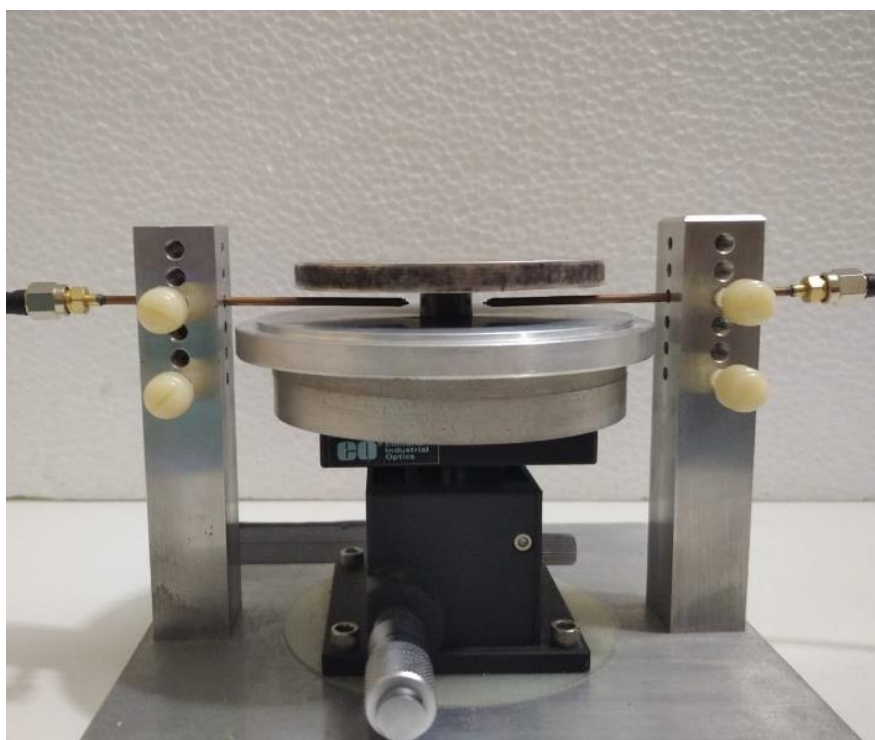
Fonte: Autoria Própria, 2020.

Devido a uma inconstância nos valores de permeabilidade, já que algumas medidas assumiram valores negativos de μ' , provavelmente causado por algum erro de medição ou calibração, e também pelo fato da limitação de frequência até 3 GHz, os projetos e simulações foram realizados com o valor medido por Fu, Jiao e Zhao (2013), de 1,1.

7.2.4 Permissividade Elétrica

O método de Hakki e Coleman utilizado neste trabalho considera as dimensões da amostra, além da frequência medida de transmissão no modo TE_{011} , assim como dito na seção 6.4.3. Assim, a peça cilíndrica foi posta na estrutura mostrada na Figura 54 para análise de S_{21} .

Figura 54 - Estrutura de medição Hakki Coleman.



Fonte: Aatoria Própria, 2020.

As Tabelas 11 e 12 apresentam os dados medidos de S_{21} por meio do Analizador de Rede Vetorial, sinalizando os valores da banda de frequência e o valor do pico, além de S_{21} , medido em dB.

Tabela 11 - Valores de S_{21} medidos no método Hakki Coleman no cilindro 1.

Medida	Frequência (GHz)	S_{21} (dB)
$f_{\text{ressonância}}$	12,907	-30,60
f_{inferior}	12,537	-33,60
f_{superior}	13,253	-33,60

Fonte: Aatoria Própria, 2020.

Tabela 12- Valores de S21 medidos no método Hakki Coleman no cilindro 2.

Medida	Frequência (GHz)	S ₂₁ (dB)
f _{ressonância}	12,908	-30,10
f _{inferior}	12,551	-33,10
f _{superior}	13,160	-33,10

Fonte: Autoria Própria, 2020.

A obtenção dos dados permite o cálculo de permissividade elétrica relativa (ϵ_r) e tangente de perdas elétrica ($\tan \delta$). Os valores calculados de ϵ_r e $\tan \delta$ podem ser observados pela Tabela 13.

Tabela 13 - Valores de permissividade relativa e tangente de perdas pelo método Hakki Coleman.

Medida	Cilindro 1	Cilindro 2
ϵ_r	9,201	9,433
$\tan \delta$	0,0464	0,0463

Fonte: Autoria Própria, 2020.

7.3 ANTENAS

A verificação da operação desse material em antenas foi realizado por meio de simulação computacional e por medição direta de seus parâmetros de reflexão. Foram analisadas as amostras cilíndricas como atuantes em Antenas de Microfita e como Antenas de Ressorador Dielétrico (DRA), ou Antenas de Ressorador Ferrimagnético (FRA).

7.3.1 Antena de Ressorador Ferrimagnético (FRA)

A amostra cilíndrica já produzida foi proposta como ressoador ferrimagnético em uma antena FRA alimentada por sonda coaxial. Foi realizada a medida de perda de retorno (S_{11}) do cilindro de Ferrita de Cobalto na estrutura proposta. A Figura 55 apresenta a estrutura utilizada para a medição da reflexão da antena.

Figura 55 - Estrutura de medição da antena DRA.



Fonte: Autoria Própria, 2020.

A Tabela 14 expõe as dimensões da estrutura mostrada.

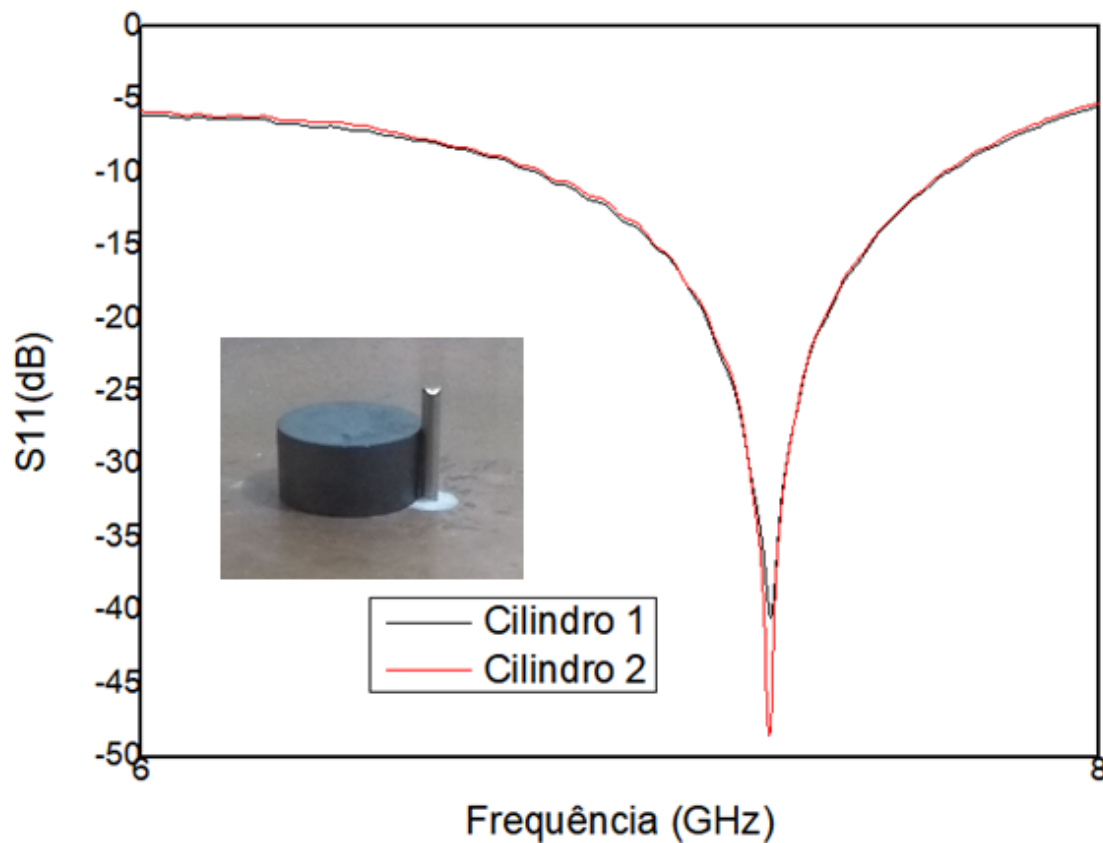
Tabela 14 - Dimensões da base de alimentação coaxial utilizada.

Dimensão	Valor (mm)
Largura da base	355
Comprimento da base	300
Espessura da base	2,11
Diâmetro do pino	1,34
Altura do pino	7,83
Diâmetro do teflon	4,05

Fonte: Autoria Própria, 2020.

A medição foi realizada para as duas amostras cilíndricas, como mostrado na Figura 56.

Figura 56 - Perda de retorno das antenas DRA medidas.



Fonte: Autoria Própria, 2020.

Pelas medidas realizadas, nota-se uma baixa perda de retorno, chegando a quase -50 dB para o cilindro 2. A Tabela 15 apresenta os dados de Frequência de ressonância, perda de retorno e largura de banda para as duas amostras cilíndricas.

Tabela 15 - Dados de reflexão medidos na antena DRA.

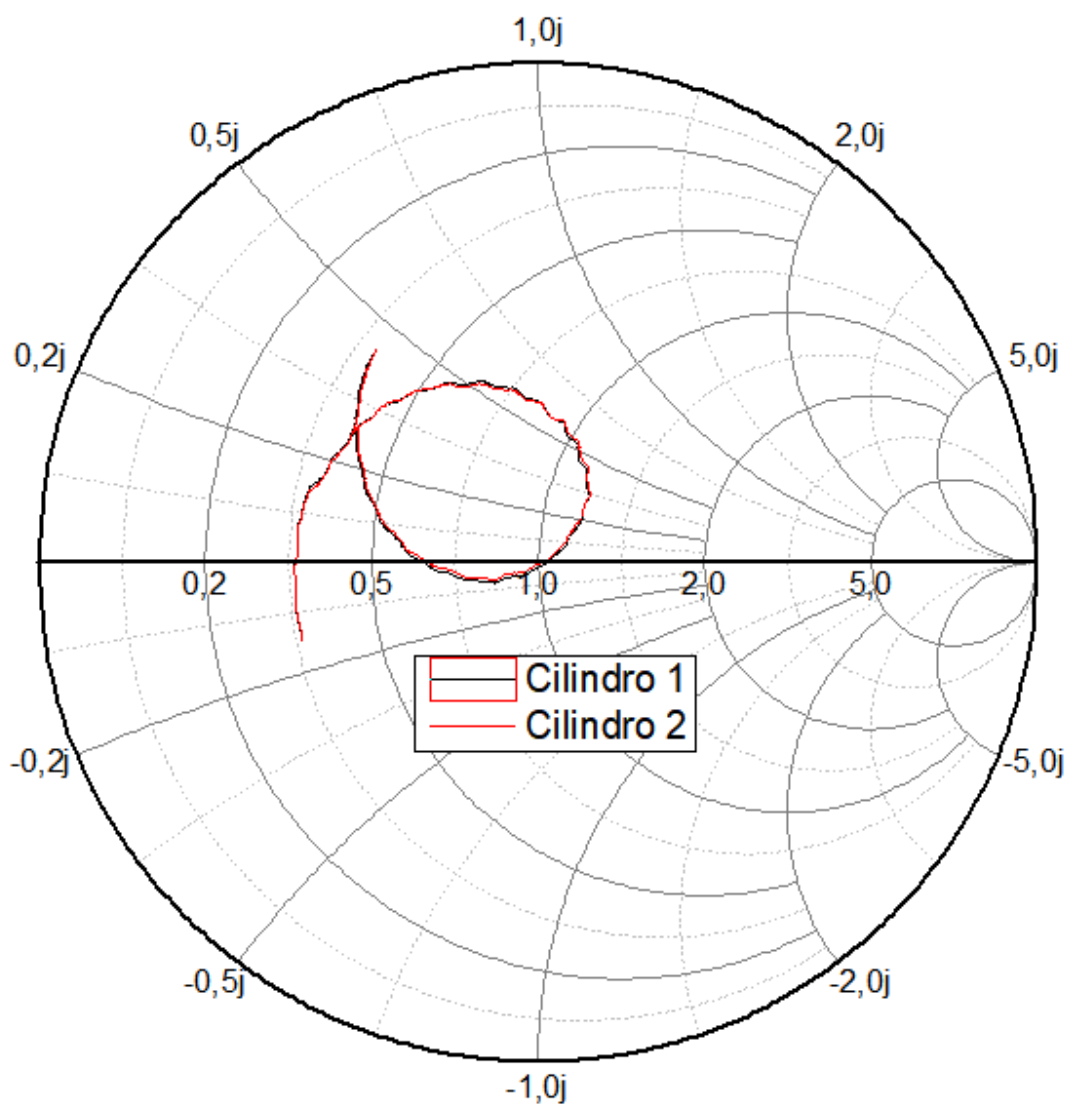
Dado	Cilindro 1	Cilindro 2
Frequência de ressonância (fr)	7,314 GHz	7,310 GHz
Perda de retorno (S ₁₁)	-40,48 dB	-48,52 dB
Largura de banda (BW)	0,86 GHz	0,84 GHz

Fonte: Autoria Própria, 2020.

Pode-se observar uma grande diferença referente à frequência de ressonância medida, mostrada na Tabela 15 e a frequência de ressonância calculada pela equação 51. A carta de Smith também pôde ser medida a partir dos dados de reflexão da antena

FRA cilíndrica de Ferrita de Cobalto. A impedância de entrada pode ser obtida pelo gráfico de carta de Smith exibido na Figura 57.

Figura 57 - Carta de Smith medida para as duas peças de Ferrita.



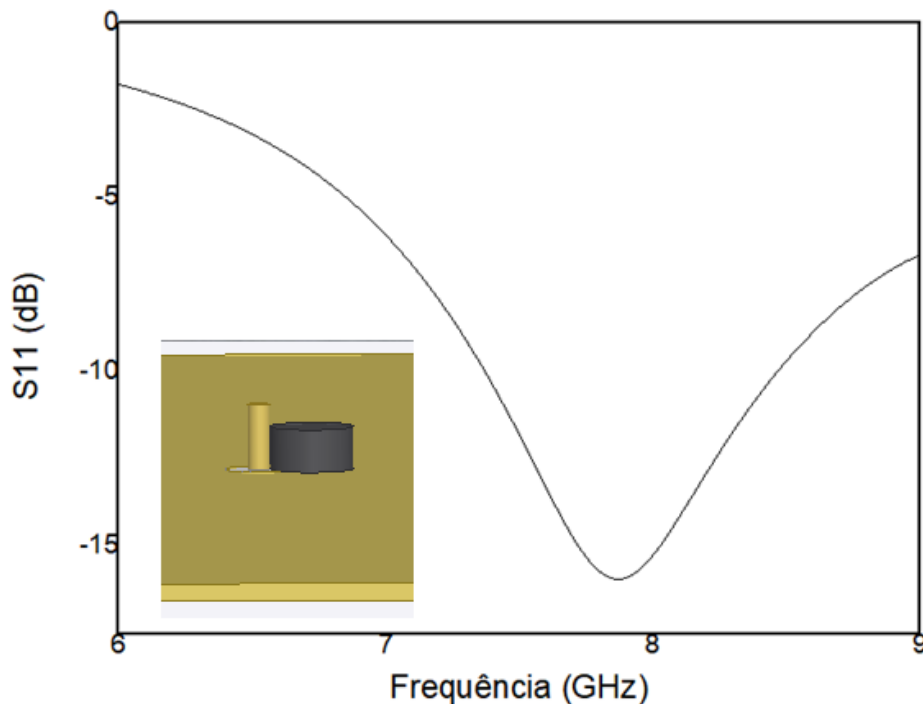
Fonte: Autoria Própria, 2020.

Pela análise dos dados, foi visto que a impedância de entrada normalizada (z_0) na medição com o Cilindro 1 foi de $50,443 - j 0,7555 \Omega$ na frequência de 7,314 GHz, e para o Cilindro 2, a impedância de entrada normalizada foi de $50,134 - j 0,055 \Omega$ na frequência de 7,310 GHz.

A simulação das antenas propostas foi realizada no software ANSYS HFSS® com o intuito de mostrar os resultados gerados por cálculo computacional. Assim, os

dados de reflexão da antenna FRA foram obtidos também por meio computacional. A Figura 58 representa a perda de retorno simulada com uma amostra de dimensões referentes ao cilindro 2.

Figura 58 - Perda de retorno simulada da antenna DRA.



Fonte: Autoria Própria, 2020.

A Tabela 16 apresenta os dados de reflexão para a antenna DRA simulada.

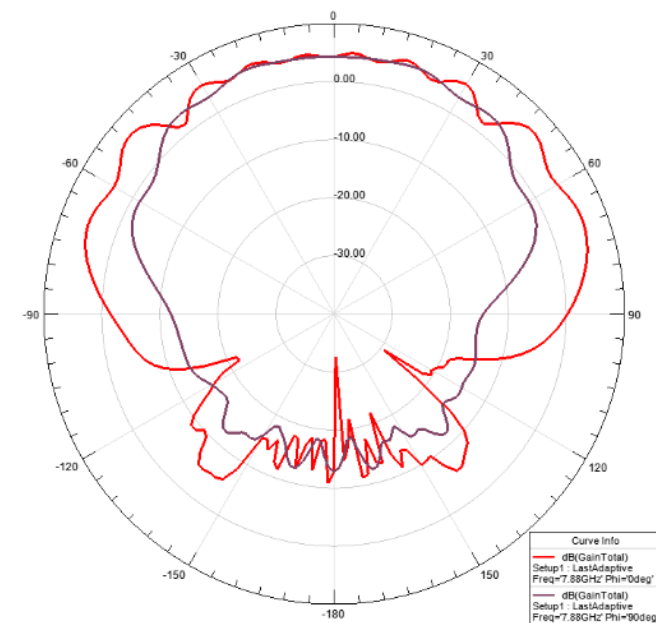
Tabela 16 - Dados de reflexão simulados na antenna DRA.

Dado	Medida
Frequência de ressonância (fr)	7,88 GHz
Perda de retorno (S_{11})	-15,947 dB
Largura de banda (BW)	1,12 GHz

Fonte: Autoria Própria, 2020.

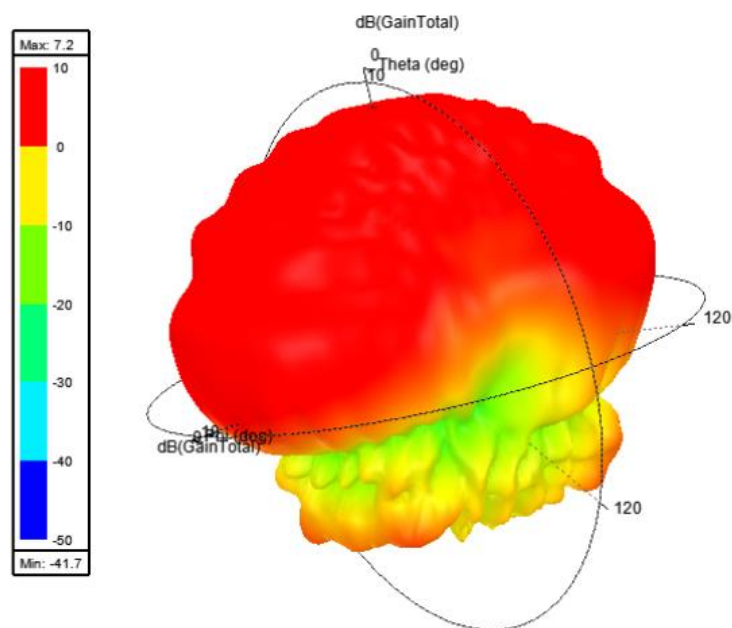
Por fim, um dado que pode ser observado pela simulação é o gráfico de ganho, tanto o tridimensional quanto o bidimensional. As Figuras 59 e 60 representam os ganhos simulados da antenna FRA no formato bidimensional e tridimensional respectivamente.

Figura 59- Diagrama de radiação bidimensional simulado da antena DRA, com $\varphi=0^\circ$ (vermelho) e $\varphi=90$ graus (roxo)



Fonte: Autoria Própria, 2020.

Figura 60 - Diagrama de radiação tridimensional simulado da antena DRA.



Fonte: Autoria Própria, 2020.

O gráfico de radiação simulado da antena mostrou um ganho máximo de 7,2 dB na direção $\varphi=0^\circ$ e $\theta=71^\circ$ e na direção $\varphi=0^\circ$ e $\theta=-71^\circ$.

As medições e simulações da antena FRA foram mostradas, com resultados satisfatórios em relação a reflexão e impedância de entrada, como pode-se ver nos

resultados mostrados. A medição realizada anterior à simulação apresentou resultados consideravelmente melhores.

7.3.2 Antena de Microfita

A antena de microfita proposta foi construída sobre o substrato de Ferrita de Cobalto fabricado por Azevedo et al (2020), que produziu o material compositor da pastilha juntamente com o material deste trabalho. A pastilha utilizada é de formato cilíndrico com diâmetro de 20,026 mm e altura de 6,856 mm e sua massa é de 6,2626g.

O projeto de uma antena de microfita retangular teve como base inicial a altura h da pastilha, além da permissividade elétrica relativa medida e a frequência escolhida como 7 GHz. As dimensões da antena projetada foram calculadas e são descritas na Tabela 17.

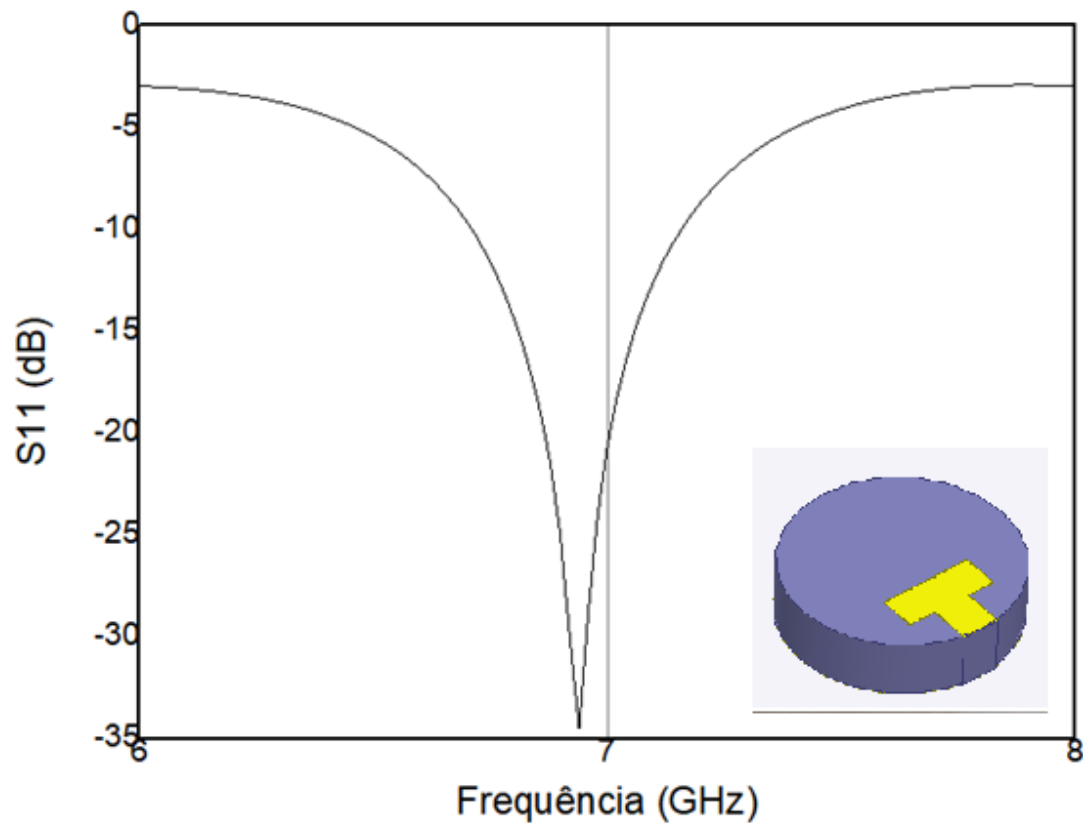
Tabela 17 - Dimensões da antena de microfita projetada.

Dimensão	Medida (mm)
W	8,99
L	3,35
W_0	3,4
L_0	3,73
h	6,856

Fonte: Autoria Própria, 2020.

A partir do projeto pôde-se iniciar o processo de simulação da antena no *software* ANSYS HFSS®. A simulação de perda de retorno, mostrada na Figura 61, retorna os dados de reflexão mostrados na Tabela 18.

Figura 61 - Perda de retorno simulada para a antena de microfita sobre substrato de Ferrita de Cobalto (CoFe_2O_4).



Fonte: Autoria Própria, 2020.

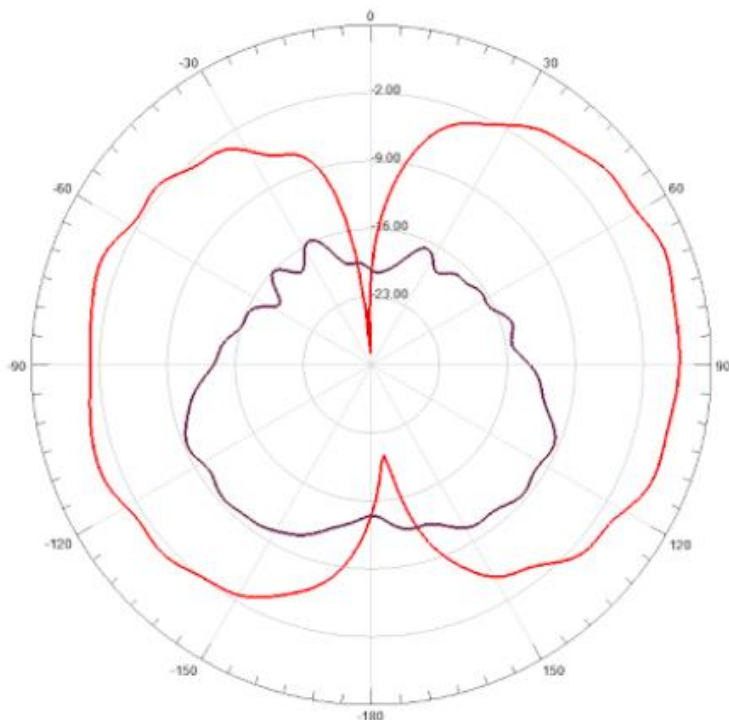
Tabela 18 - Dados de reflexão simulados para a antena de microfita.

Dado	Medida
Frequência de ressonância (fr)	6,94 GHz
Perda de retorno (S_{11})	-34,52 dB
Largura de banda (BW)	0,44 GHz

Fonte: Autoria Própria, 2020.

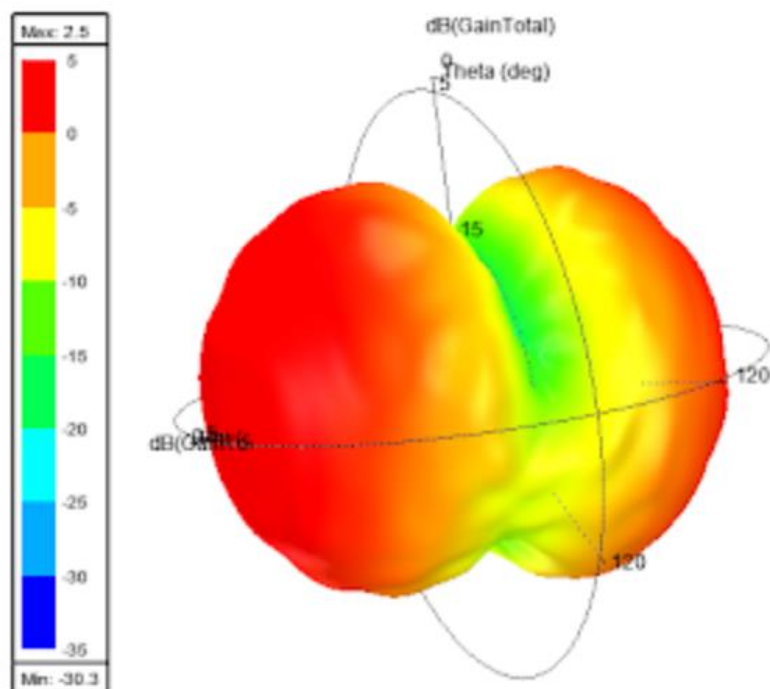
Foi possível também a obtenção do diagrama de radiação simulado da antena de microfita, como mostra as Figuras 62 e 63 com o diagrama bidimensional e tridimensional respectivamente.

Figura 62 - Diagrama de radiação bidimensional simulado da antena de microfita, com $\phi=0^\circ$ (vermelho) e $\phi=90$ graus (roxo)



Fonte: Autoria Própria, 2020.

Figura 63 - Diagrama de radiação tridimensional da antena de microfita.



Fonte: Autoria Própria, 2020.

O diagrama de radiação mostrado apresenta um ganho máximo de 20,21 dB na direção de $\varphi = 0^\circ$ e $\theta = 66^\circ$.

A antena foi construída utilizando o substrato de Ferrita de Cobalto, assim como mostra a Figura 64, e foi testada utilizando o Analisador de Rede Vetorial da marca Rhode-Schwarz, retornando assim os valores de perda de retorno e de impedância de entrada.

Figura 64 - Antena de micro fita construída (a) e a medição de sua reflexão no Analisador de Redes Vetorial (b)



(a)

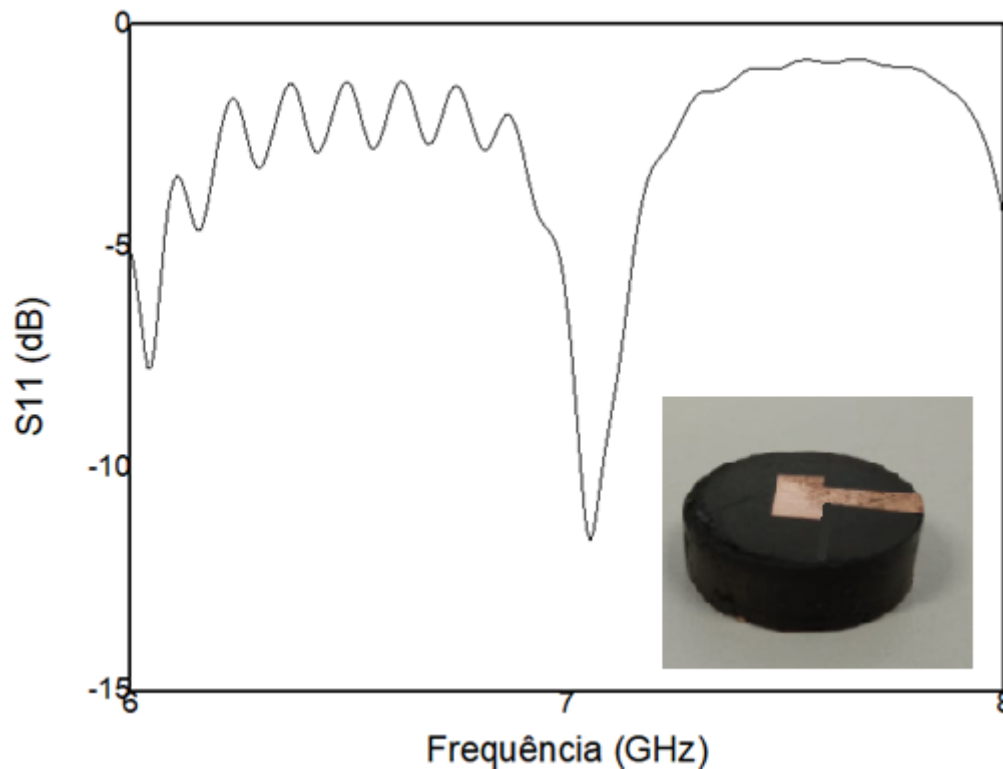


(b)

Fonte: Autoria Própria, 2020.

A medição da perda de retorno pode ser observada pelo gráfico na Figura 65, com sua frequência de ressonância e largura de banda especificadas logo abaixo, na Tabela 19.

Figura 65 - Perda de retorno medida da antena de microfita.



Fonte: Autoria Própria, 2020.

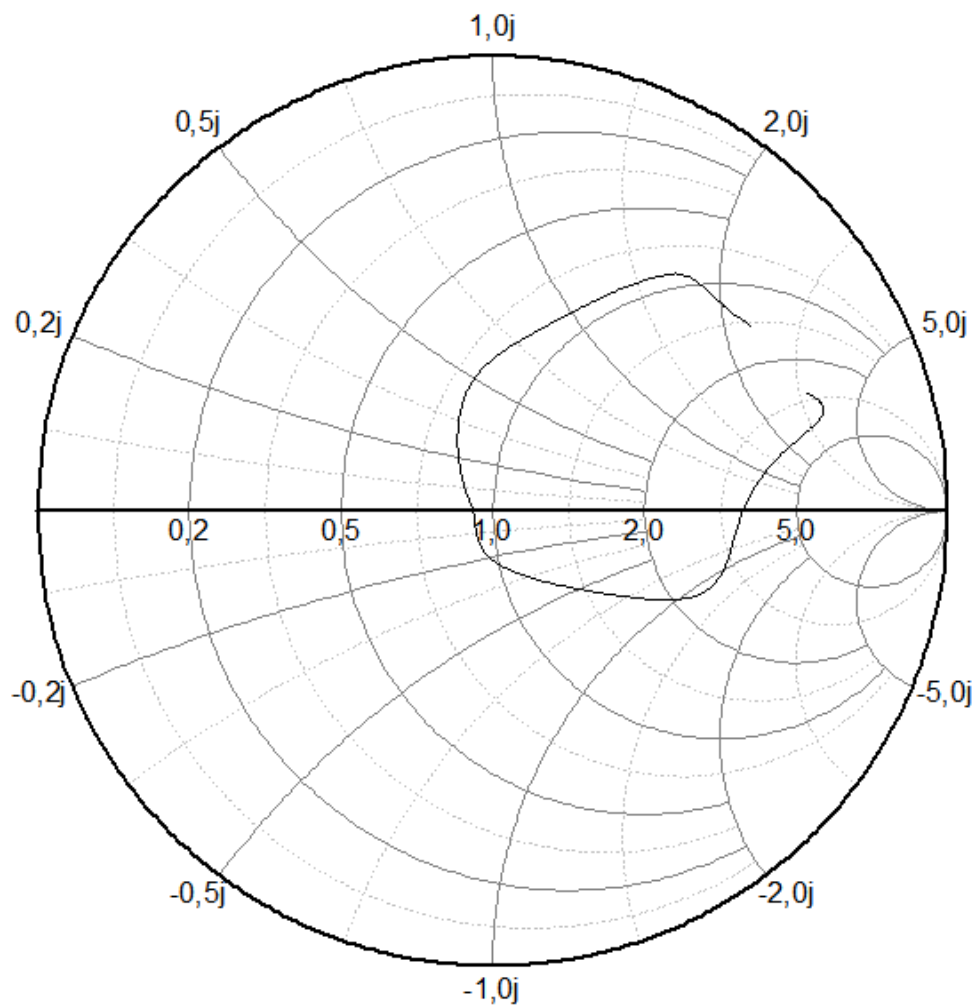
Tabela 19 - Dados de reflexão medidos na antena de microfita.

Dado	Medida
Frequência de ressonância (fr)	7,053 GHz
Perda de retorno (S_{11})	-11,62 dB
Largura de banda (BW)	0,0525 GHz

Fonte: Autoria Própria, 2020.

O gráfico da carta de Smith foi também obtido na medição. A medida apresenta uma impedância de entrada de $38,28 -j 25,91 \Omega$ na frequência de ressonância medida. A Figura 66 representa a medida de impedância de entrada da antena de microfita por meio da carta de Smith.

Figura 66 - Carta de smith medida da antena de microfita construída.



Fonte: Autoria Própria.

As simulações e medições realizadas no projeto da antena de microfita com substrato de Ferrita de Cobalto apresentam resultados de frequência de ressonância e impedância de entrada pouco satisfatórios em comparação com os dados da antena FRA, principalmente os dados medidos, provavelmente por uma construção com pouco acabamento. Porém um adequado casamento de impedância realizado consegue melhorar esses resultados.

8 CONCLUSÃO

A proposta deste trabalho foi o desenvolvimento do material Ferrita de Cobalto (FeCo_2O) para aplicações em dispositivos ressoantes. A característica magnética deste material foi também algo a ser estudado nestes dispositivos, analisando a capacidade da atuação como antenas ressoadoras dielétricas e antenas de microfita.

As antenas produzidas mostraram sua viabilidade no que se refere a características de reflexão. Todas apresentaram uma perda de retorno inferior a -10 dB, o critério para reflexão de no máximo 10% da potência recebida pelo circuito.

Os resultados de antenas com ressoador dielétrico (DRA) se sobressaíram em comparação com as antenas de microfita. Notou-se que a antena DRA com a utilização do cilindro 2 apresentou uma perda de retorno de -48,52 dB, juntamente com uma impedância de entrada igual a $50,134 - j 0,055 \Omega$ na mesma frequência de ressonância.

Os diagramas de radiação simulados apresentaram comportamento direcional, porém a radiação observada pela antena de microfita na simulação não foi normal ao patch da antena, como deveria ser.

A técnica Sol-Gel abordada pelo trabalho mostrou que foi possível a fabricação do material num tempo relativamente curto, quando em comparação com o método de coprecipitação, e com um resultado eficaz, quando mostrado pela caracterização.

Os processos utilizados neste trabalho, quando controlados adequadamente são promissores e facilmente reproduzíveis. As etapas de calcinação e sinterização são essenciais na característica morfológica do material.

A caracterização eletromagnética do material, realizada pelos métodos Hakki Coleman e o método da indutância permitiram uma melhor análise do material e a simulação por meio do *software* ANSYS HFSS®. A amostra produzida para a antena FRA foi simulada após a medição, em detrimento de já ser obtido os valores de reflexão da antena.

Uma sugestão para a continuação deste trabalho é a análise da porosidade das amostras, assim como uma reconfiguração da frequência de ressonância da antena com base em um campo magnético externo a esta. Pode ser proposto também a formação de compostos de Ferrita de Cobalto e outros materiais, ferrimagnéticos ou não.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA FILHO, V. 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.

ANTONIO, Selma Gutierrez. Aplicação do Método de Rietveld em caracterização estrutural e nanoestrutural do espinélio $\text{Ni}_1-\delta\text{Co}\delta\text{Fe}_2\text{O}_4$ preparado por Reação de Combustão. 2016. 102 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-graduação Institucional em Ciência e Tecnologia de Materiais, Universidade Estadual Paulista, Araraquara, 2006.

ASSIS, Raimison Bezerra de. Síntese E Caracterização De Ferrita Ni-Zn Pelo Método Dos Precursores Poliméricos Calcinada Pela Energia De Microondas. 2013. 117 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal - RN, 2013.

AZEVEDO, Lucas Oliveira de; QUEIROZ JUNIOR, Idalmir de Souza; SILVA, Pedro Bruno Nogueira da; GURGEL, Nathan Bezerra; SILVA, Isaac Barros Tavares da; PAIVA, José Lucas da Silva. Antena de microfita sobre substrato de ferrita de cobalto. MossoróiRN, jan. 2020.

BAHL, I. J.; BHARTIA, P. Microstrip Antenna Technology. IEEE Trans. Antennas Propagation., vol. ap-29, nº 1, p. 2-24, 1981.

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

BARROS, V. E. Estudo do Efeito de Substrato Metamaterias em Parâmetros de Antenas de Microfita. Dissertação de Mestrado apresentada ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação da UFRN. Natal, 2012.

BOYLESTAD, Robert L.. Introdução à Análise de Circuitos. 12. ed. São Paulo: Pearson, 2012.

BRAGA, A. N. S. et al. Síntese de mulita pelo processo sol-gel: Uma revisão da literatura. Revista Eletrônica de Materiais e Processos, [s. l.], v. 9, n. 2, p.60-73, jul. 2014.

BRAGG, W. H.. The Structure of the Spinel Group of Crystals. Philos. Mag.. Aa, p. 305-315. ago. 1915.

CALIL, Vanessa Luz e. Desenvolvimento e caracterização de substratos compósitos flexíveis para aplicação em dispositivos orgânicos. 2014. 182 f. Tese (Doutorado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Física, Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro, 2014.

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

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).

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

DONATTI, Dario Antonio. Estudo do Processo SOL-GEL para a Obtenção de Xerogeis e Aerogeis Monolíticos. 2013. 117 f. Tese (Doutorado) - Curso de Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2013.

EBELMAN, M. Recherches sur les combinaisons des acides borique et silicique avec les éthers. Annales de Chimie et de Physique, 16, 129-166, 1846.

FONSECA, Saulo Gregory Carneiro; NEIVA, Laédna Souto; BONIFÁCIO, Maria Aparecida Ribeiro; SANTOS, Paulo Roberto Cunha dos; SILVA, Ubiratan Correia;

OLIVEIRA, João Bosco Lucena de. Tunable Magnetic and Electrical Properties of Cobalt and Zinc Ferrites $\text{CO}_1\text{-XZnXFe}_2\text{O}_4$ Synthesized by Combustion Route. *Materials Research*, [S.L.], v. 21, n. 3, p. 1-9, 12 mar. 2018. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/1980-5373-mr-2017-0861>.

FREITAS, Joao Victor de; MELQUIADES, Antônia Daiara de Almeida; LIMA, André Lopes de; LAVOR, Otávio Paulino. Análise da influência do ressonador quadrado em antenas de microfita com plano de terra truncado. XXXVI Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais - Sbrt2018. Campina Grande - PB. set. 2018.

FU, Min; JIAO, Qingze; ZHAO, Yun. In situ fabrication and characterization of cobalt ferrite nanorods/grapheme composites. *Materials Characterization*, Beijing, p. 303-315, 17 out. 2013.

GHAVAMI, M. et al. *Ultra Wideband: Signals and Systems in Communication Engineering*. West Sussex: John Wiley & Sons. p. 278. 2004.

GRAHAM, T. On the properties of silicic acid and other analogous colloidal substances. *Journal of the Chemical Society*, 17, 318-327, 1864.

GUL, I.H.; MAQSOOD, A.. Structural, magnetic and electrical properties of cobalt ferrites prepared by the sol-gel route. *Journal Of Alloys And Compounds*, [S.L.], v. 465, n. 1-2, p. 227-231, out. 2008. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jallcom.2007.11.006>.

GURGEL, Nathan Bezerra. Desenvolvimento de substrato de ferrita de cobalto (CoFe_2O_4) para antenas de microfita. 2017. 10 f. TCC (Graduação) - Curso de Bacharelado em Ciência e Tecnologia, Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, 2017.

HAKKI, B.W.; COLEMAN, P.D. A Dielectric Resonator Method of Measuring Inductive Capacities in the Millimeter Range. *IEEE Transactions On Microwave*

Theory And Techniques, [s.l.], v. 8, n. 4, p.402-410, jul. 1960. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE).

HAMMERSTAD, E. O. Equations for a Microstrip Circuit Design. Proc. Fifth European Microwave Conf., p. 268-272, Setembro 1975.

HAYT JUNIOR, William H; BUCK, John A.. Eletromagnetismo. 8. ed. Porto Alegre: McGraw Hill, 2013.

HIRATSUKA, Renato Satoshi; SANTILLI, Celso Valentim; PULCINELLI, Sandra Helena. O Processo Sol-Gel: Uma Visão Físico-Química. Química Nova. [s. L.], p. 171-180. ago. 1994.

HOLANDA, Samanta Mesquita de. Estudo e Desenvolvimento de Antenas de Microfita Utilizando Tecido de Malha à Base de Fibras Têxteis Compostas. 2016. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Comunicação e Automação, UFERSA, Mossoró, 2016.

HOUSHIAR, Mahboubeh; ZEBHI, Fatemeh; RAZI, Zahra Jafari; ALIDOUST, Ali; ASKARI, Zohreh. Synthesis of cobalt ferrite (CoFe₂O₄) nanoparticles using combustion, coprecipitation, and precipitation methods: a comparison study of size, structural, and magnetic properties. Journal Of Magnetism And Magnetic Materials, [S.L.], v. 371, p. 43-48, dez. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmmm.2014.06.059>.

K. TECHNOLOGIES, Basics of Measuring the Dielectric Properties of Materials, Application Note, United States of America: Mar. 2017.

KANG, S.J.L. Sintering: densification, grain growth, and microstructure. Butterworth-Heinemann. 2005.

KEYROUZ, S.; D.CARATELLI. Dielectric Resonator Antennas: Basic Concepts, Design Guidelines, and Recent Developments at Millimeter-Wave Frequencies. International Journal Of Antennas And Propagation, p. 1-2. jul. 2016.

KRANENBURG, R. A., LONG, S. A. "Microstrip transmission line excitation of dielectric resonator antennas", *Electronic Letters*, vol. 24, nº 18, pp. 1156-1157, Sep. 1988.

LEGG, A. P. Capítulo III: Parâmetros principais de uma antena. 14 p. Notas de Aula. Grupo de Pesquisa em Processamento de Sinais e Comunicações, UFSM. Disponível em: <<http://coral.ufsm.br/gpscom/professores/andrei/Semfio/cap6tulo%203.pdf>>.

LONG, L. A.; MCALLISTER, M. W.; SHEN, L. C.. The Resonant Cylindrical Dielectric Cavity Antenna. *Ieee Transactions On Antennas & Propagation*. p. 406-412. mar. 1983.

MAAZ, K.; KARIM, S.; MUMTAZ, A.; HASANAIN, S.K.; LIU, J.; DUAN, J.L.. Synthesis and magnetic characterization of nickel ferrite nanoparticles prepared by co-precipitation route. *Journal Of Magnetism And Magnetic Materials*, [S.L.], v. 321, n. 12, p. 1838-1842, jun. 2009. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmmm.2008.11.098>.

MARTÍN, David. Un repaso al funcionamiento de las antenas, sus tipos y aplicaciones en una red Wi-Fi. Disponível em: <<https://www.geektopia.es/es/technology/2015/10/07/articulos/antenas-conoce-como-funcionan-aprende-colocar-tu-router-repetidor-senal-wi-fi.html>>. Acesso em: 06 ago. 2020.

MCALLISTER, M. W.; LONG, S. A.. Rectangular Dielectric-Resonator Antenna. *IEEE Electronics Letters*. p. 218-219. mar. 1983.

MCALLISTER, M. W.; LONG, S. A.. Resonant Hemispherical Dielectric Antenna. *Ieee Electronics Letters*. p. 657-659. ago. 1984.

MEDEIROS, T. E. L. Antenas de microfita sobre substrato dielétrico organizado de

forma quase periódica. Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de PósGraduação em Sistemas de Comunicação e Automação da UFERSA, Mossoró, 2013.

MOHIT K., GUPTA, V. R., ROUT, S. K. “Structural and microwave characterization of $Ni_{0.2}Co_xZn_{0.8-x}Fe_2O_4$ for antenna applications”, *Ceramics International*, vol. 40, pp. 1575-1586, Jul. 2013.

MORAIS, G. A., *Desenvolvimento da metalurgia do pó*, Brasil: EDUFRN, 2012.

NASERI, Mahmoud Goodarz et al. Simple Synthesis and Characterization of Cobalt Ferrite Nanoparticles by a Thermal Treatment Method. *Journal Of Nanomaterials*, [s.l.], v. 2010, p.1-8, 2010. Hindawi Limited.

NISHIKAWA, S.. Structure of Some Crystals of the Spinel Group. *Proc. Math. Phys. Soc. Tokyo*. Tóquio, p. 199-209. jan. 1915.

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.

OLIVEIRA, Maciel A.; OLIVEIRA, Elder E. C.; G. NETO, Alfredo. Análise Paramétrica Em Uma Antena Patch Retangular De Microfita Com Fendas. *Revista Innover*, João Pessoa, v. 1, n. 4, dez. 2014.

PAULO, E. G., PINHO, M. S., LIMA, R. C. GREGORI, M. L., OGASAWARA, T., “Compósitos de ferrita de Ni-Zn com policloropreno para utilização como materiais absorvedores de radar para a banda S”, *Cerâmica*, vol. 50, pp. 161-165, 2004.

PECHINI, M. G.. Method of preparing lead and alkaline earth titanates and niobates and coating method using the same to form a capacitor. . US n. US3330697A. Depósito: 26 ago. 1963. Concessão: 11 jul. 1967.

PETOSA, Aldo. Dielectric Resonator Antenna Handbook. Norwood, Ma: Artech House, 2007.

PINHEIRO, Antônia Veruska Benevides. Exchange bias e medidas de hipertermia em estruturas tipo core/shell $\text{CoFe}_2\text{O}_4/\text{CoFe}_2\text{O}_4/\text{Ag}$. 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.

RAMESH, M.; KB, Yip. Design Formula for Inset Fed Microstrip Patch Antenna. Journal Of Microwaves And Optoelectronics. Pinang, p. 5-10. dez. 2003.

RICHTMYER, Robert Davis. Dielectric Resonators. Journal Of Applied Physics. p. 391-398. Junho de 1939.

ROY, D. M., ROY, R. An experimental study of the formation and properties of synthetic serpentines and related layer silicate minerals. American Mineral. 39, 957-975, 1954.

SAGADEVAN, Suresh; PODDER, Jiban; DAS, Isha. Synthesis and Characterization of Cobalt Ferrite (CoFe_2O_4) Nanoparticles Prepared by Hydrothermal Method. Springer Proceedings In Physics, [s.l.], p.145-152, 2017. Springer International Publishing.

SANTOS, Cochiran Pereira dos. Síntese e caracterização de NiFe_2O_4 . 2011. 89 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão - Se, 2011.

SICKAFUS, Kurt E.; WILLS, John M.; GRIMES, Norman W.. Structure of Spinel. Journal Of The American Ceramic Society, [s.l.], v. 82, n. 12, p.3279-3292, 21 dez. 2004. Wiley.

SILVA, Isaac Barros Tavares da. Desenvolvimento de Material Ferrimagnético do tipo NiFe₂O₄ para Aplicação em Sistemas de Comunicação de Micro-ondas. 2019. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação, UFRN, Natal, 2019.

SORRENTINO NETO, A. Síntese, caracterização e propriedades magnéticas de ferritas de níquel – cobre, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal da Paraíba, 2016.

SOUZA D. Uso do Pentóxido de Nióbio para Aplicação como Substrato de Antenas de Microfita. Dissertação de Mestrado. PPGSCA. UFERSA. 2015.

ULLAH, U., AIN, M. F., OTHMAN, M. ZUBIR, I. A., MAHYUDDIN, N. AHMAD, Z., ABDULLAH, M. Z., “A Novel Multi-permittivity Cylindrical Dielectric Resonator Antenna for Wideband Applications”, Radioengineering, vol. 23, nº 4, pp. 1071-1076, Dec. 2014.

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.

VIEIRA, D. A., DINIZ, V. C. S., KIMINAMI, R. H. G. A., CORNEJO, D. R., COSTA, A. C. F. M. “Ferritas NiZn sintetizadas por reação de combustão em condições diferentes”, 56º Congresso Brasileiro de Cerâmica, Curitiba, Brasil, pp. 650-661, 2012.