



Marília Gabriela Alves Rodrigues Santos

**Investigação do Uso de Ressonadores com Geometria
Matrioska em Antenas Planares**

João Pessoa - PB

Junho de 2020



Marília Gabriela Alves Rodrigues Santos

Investigação do Uso de Ressonadores com Geometria Matrioska em Antenas Planares

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Instituto Federal da Paraíba, como requisito necessário à obtenção do grau de Mestre em Ciências no domínio da Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Eletromagnetismo Aplicado.

Orientador: Jefferson Costa e Silva, Prof. Dr.

Coorientador: Alfredo Gomes Neto, Prof. Dr.

João Pessoa - PB, Junho de 2020

✉ Marília Gabriela Alves Rodrigues Santos - gmarilialves@gmail.com.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Biblioteca Nilo Peçanha do IFPB, *campus* João Pessoa

S237i	Santos, Marília Gabriela Alves Rodrigues. Investigação do uso de ressoadores com geometria matrioska em antenas planares / Marília Gabriela Alves Rodrigues Santos. - 2020. 68 f. : il. Dissertação (Mestrado - Engenharia Elétrica) – Instituto Federal de Educação da Paraíba / Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE), 2020. Orientador : Profº. D.r Jefferson Costa e Silva. Coorientador : Profº D.r Alfredo Gomes Neto. 1. Antena de microfita . 2. Estrutura DGS. 3. SRR. 4. Geometria de matrioska. 5. Comunicação sem fio. I. Título. CDU 621.396.67(043)
-------	--

Lucrecia Camilo de Lima
Bibliotecária
CRB 15/132

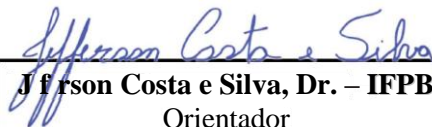
MARÍLIA GABRIELA ALVES RODRIGUES SANTOS

Investigação do Uso de Ressonadores com Geometria Matrioska em Antenas de Planares

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Instituto Federal da Paraíba, como requisito necessário à obtenção do grau de Mestre em Ciências no domínio da Engenharia Elétrica.

Trabalho aprovado pela banca examinadora em: 12/06/2020:

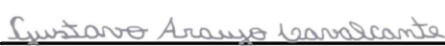
BANCA EXAMINADORA


Jefferson Costa e Silva, Dr. – IFPB
Orientador


Alfredo Gomes Neto, Dr. – IFPB
Coorientador


José de Ribamar Silva Oliveira, Dr. – IFRN
Examinador Externo


Jefferson Nogueira de Carvalho, Dr. – IFPB
Examinador Interno


Gustavo Araújo Cavalcante, Dr. – IFPB
Examinador externo ao programa

João Pessoa - PB

Junho de 2020

“Sabemos que Deus age em todas as coisas para o bem daqueles que o amam, dos que foram chamados de acordo com o seu propósito.”

Romanos 8:28, NVI

Agradecimentos

A Deus, por me permitir viver essa experiência da melhor forma possível, sendo Ele sempre meu sustento diante das circunstâncias e renovo em cada etapa vivida.

Ao meu esposo, Gregório Nogueira, por todo amor, companheirismo, cuidado e apoio em todos os momentos. Sendo ele essencial nessa conquista, por sempre me incentivar e fazer o possível para eu venha a ter êxito nas situações que enfrento durante a vida.

Aos meus pais, Marcos Antônio e Ana Lúcia, por todo amor, preocupação amorosa, carinho, investimento e confiança.

Ao meu orientador, Jefferson Costa e Silva, por toda orientação, paciência, confiança, dedicação e conhecimentos que possibilitaram a realização desse trabalho.

Ao meu coorientador, Alfredo Gomes Neto, por todo incentivo, disponibilidade, compreensão e ensinamentos, que me inspiraram a melhorar no pessoal e profissional.

Aos demais professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Instituto Federal da Paraíba, que eu tive o prazer de estudar e aprender.

Ao Instituto Federal da Paraíba, por fazer parte da minha formação profissional.

Aos meus familiares e amigos, que de alguma forma me apoiaram e contribuíram para desenvolvimento deste trabalho.

Resumo

Com todo o crescimento na área de telecomunicações através de aplicações que utilizam a comunicação sem fio, a demanda por novos dispositivos cada vez menores e mais eficientes para esse sistema tem crescido. A antena é um elemento essencial no sistema de comunicação sem fio, e tem sido desejável que ela seja miniaturizada conservando o desempenho. Diante dessas condições a antena de microfita, tem obtido destaque por sua facilidade de adequação em diferentes tipos de superfícies e facilidade de fabricação. Algumas técnicas têm sido desenvolvidas para obter a miniaturização das antenas de microfita, sendo uma dessas técnicas a *Defected Ground Structure* (DGS), que mediante a inserção de fendas no plano de terra da antena ocasiona modificações nos seus parâmetros de modo que se obtém uma diminuição da frequência de ressonância sem alterar o tamanho e o desempenho da antena. Essas fendas podem apresentar diferentes geometrias, havendo trabalhos que obtiveram bons resultados utilizando anéis circulares repartidos (SRR, *Split Ring Resonators*) como base para essa abertura no plano de terra. Neste trabalho é apresentada a antena de microfita retangular com estrutura DGS baseada nas geometrias matrioskas fechada e aberta, tendo como suporte para comparação dos resultados a antena de microfita retangular com estrutura DGS baseada nos SRR, verificando a redução da frequência de ressonância para as antenas de microfita e observado os efeitos das ressonâncias das estruturas DGS nessa redução. Dessa forma, estruturas DGS baseadas nas geometrias matrioska e SRR foram utilizadas em antenas de microfita com frequências de ressonâncias em 2,5 GHz, 3 GHz e 3,5 GHz. O melhor resultado, considerando a redução da frequência de ressonância, coeficiente de reflexão e ganho, foi obtido com a antena de microfita com a estrutura DGS contendo quatro elementos baseadas na geometria matrioska aberta ressoando em aproximadamente 2,5 GHz. Com essa miniaturização a área do *patch* da antena de microfita foi reduzida em até 45,6%, sendo observado que quanto menor a ressonância da estrutura DGS maior a redução da frequência da antena de microfita.

Palavras-Chave: Antena de Microfita, DGS, SRR e Geometria Matrioska.

Abstract

With all the growth in the telecommunications area through applications that use wireless communication, the demand for new and smaller and more efficient devices for this system has grown. The antenna is an essential element in the wireless communication system, and it has been desirable for it to be miniaturized while conserving performance. In view of these conditions, the microfiche antenna has been highlighted for its ease of adaptation on different types of surfaces and ease of manufacture. Some techniques have been developed to obtain the miniaturization of the antenna tapes, one of which is the Defected Ground Structure (DGS), which, by inserting cracks in the antenna's ground plane, causes changes in its parameters so that a decrease in resonance frequency is achieved without changing the size and performance of the antenna. These cracks can present different geometries, with works that have obtained good results using divided circular rings (SRR, Split Ring Resonators) as the basis for this opening in the ground plane. In this work, the rectangular microfiche antenna with DGS structure based on closed and open matrioska geometries is presented, with the support of comparing the results of the rectangular microfiche antenna with DGS structure based on SRR, verifying the reduction of the resonance frequency for the antennas of microfiche and observed the effects of the resonances of the DGS structures in this reduction. In this way, DGS structures based on matrioska and SRR geometries were used in microfiche antennas with resonance frequencies at 2,5 GHz, 3 GHz and 3,5 GHz. The best result, considering the reduction in the resonance frequency, reflection coefficient and gain, it was obtained with the microfiche antenna with the DGS structure containing four elements based on the open matrioska geometry resonating at approximately 2,5 GHz. With this miniaturization the area of the microfite antenna patch was reduced by up to 45,6 %, and it is observed that the lower the resonance of the DGS structure, the greater the reduction in the frequency of the microfiche antenna.

Keywords: Microfita Antenna, DGS, SRR and Matrioska Geometry.

Lista de Siglas e Símbolos

4G Quarta Geração de Telefonia Móvel

5G Quinta Geração de Telefonia Móvel

ANSYS *Analysis Systems*

CSRR *complementary Split Ring Resonator*

DGS *Defected Ground Structure*

EBG *Electromagnetic Band Gap*

FR-4 Substrato de Fibra de Vidro

FSS Superfícies Seletiva em Frequência

GTEMAG Grupo de Telecomunicações e Eletromagnetismo Aplicado

IFPB Instituto Federal da Paraíba

IoT *Internet of Things*

LC Associação de Indutor e capacitor

PBG *Photonic Band Gap*

RLC Associação de Resistor, Indutor e capacitor

SRR *Split Ring Resonator*

λ Comprimento da onda

Θ Ângulo entre os eixos x-z

ϵ_{ref} Constante dielétrica efetiva do substrato

ϵ_r Constante dielétrica do substrato

ϕ Ângulo entre os eixos x-y

cLargura dos anéis do SRR

CmCapacitância de acoplamento

dDistância entre os anéis

f_r Frequência de ressonância

gEspaçamento que secciona as laterais do anel

hAltura do substrato

LComprimento da antena de microfita

L_{efet} Comprimento efetivo da matrioska

Lc1Espaçamento entre os anéis da matrioska

Lx1Comprimento do lado externo da matrioska ao longo do eixo x

Lx2Comprimento do lado interno da matrioska ao longo do eixo x

Ly1Comprimento do lado externo da matrioska ao longo do eixo y

Ly2Comprimento do lado interno da matrioska ao longo do eixo y

RResistência

r_{ext} Raio externo do SRR

r_{int} Raio interno do SRR

S21Parâmetro S, equivalente ao coeficiente de transmissão

vVelocidade da luz

WLargura da antena de microfita

Lista de Figuras

1	Célula de ressoador de anéis repartidos.	15
2	Exemplo de bonecas matrioska.	16
3	Geometria matrioska.....	16
4	Antena de microfita.	19
5	Exemplo de algumas formas geométricas para <i>patch</i> de antenas de microfita.	19
6	Alimentação por linha de alta impedância. (a) uso de <i>inset-fed</i> . (b) transformador de $\lambda/4$	22
7	(a) Linha de microfita na vista isométrica (b) Vista frontal das linhas de campo elétrico.	23
8	Circuito equivalente LC da estrutura DGS.	24
9	Linha de microfita com estrutura DGS em forma de alteres retangular.....	25
10	Circuito equivalente RLC da estrutura DGS.....	25
11	Circuito equivalente π da estrutura DGS.....	26
12	Diferentes formatos de defeitos que podem ser gravados no plano de terra de uma antena de microfita.	26
13	(a) Geometria SRR e (b) Geometria CSRR.....	27
14	Modelo de circuito equivalente do SRR.....	28
15	Geometria anéis concêntricos e circuito LC equivalente.	29
16	Geometria matrioska e seu circuito LC equivalente.....	30
17	Dimensões básicas da geometria matrioska.	31
18	Comprimento efetivo para uma geometria matrioska.	31
19	Expandindo os anéis da geometria matrioska aberta com a fenda no anel interno.	32
20	Elemento de geometria matrioska fechada no ANSYS Designer.....	33
21	Desenho do elemento SRR no ANSYS Designer.	34
22	Ilustração do <i>setup</i> de medição utilizando o analisador de redes Agilent E5071C.	35
23	Antena de microfita retangular.	37
24	Resposta em frequência do elemento de geometria matrioska fechada - ANSYS Designer.	38

25	Resposta em Frequência do elemento SRR - ANSYS Designer.	39
26	Resposta em Frequência do elemento de geometria matrioska de 3 GHz.	40
27	Desenho da antena com estrutura DGS baseada na geometria matrioska fechada projetada para 3 GHz.	41
28	Resposta em frequência da antena com estrutura DGS baseada na geometria matrioska fechada projetada para 3 GHz.	41
29	Estrutura DGS baseada na geometria matrioska fechada.....	42
30	Resposta em frequência da antena de 3 GHz com estrutura DGS baseada na geometria matrioska fechada de 2,5 GHz.	43
31	Resposta em frequência da antena de microfita. ($f_{Antena} = 2,5$ GHz)	44
32	Diagrama de radiação em 3D da antena de microfita. ($f_{Antena} = 2,5$ GHz) .	44
33	Desenhos da antena de microfita com estruturas DGS de dimensões equivalentes.	45
34	Resposta em frequência das antenas com estruturas DGS de dimensões equivalentes, baseadas na geometria matrioska fechada e no SRR.	46
35	Diagrama de radiação em 3D da antena de microfita com estrutura DGS de dimensões equivalentes.	46
36	Diagrama de radiação em 2D para $\phi=0$ da antena de microfita com estrutura DGS de dimensões equivalentes.	47
37	Diagrama de radiação em 2D para $\phi=90$ da antena de microfita com estrutura DGS de dimensões equivalentes.	47
38	Frequência de ressonância \times Comprimento do elemento de geometria matrioska fechada.	49
39	Frequência de ressonância \times Diâmetro do elemento baseado no SRR.	49
40	Frequência de ressonância \times Dimensão dos elementos.	50
41	Resposta em frequência da antena em microfita <i>patch</i> retangular. ($f_{Antena} = 3,5$ GHz).....	51
42	Desenho da antena com estrutura DGS (um elemento).	52
43	Resposta em frequência da antena com estrutura DGS.	53
44	Diagrama de radiação em 3D da antena com estrutura DGS(um elemento). ..	54

45	Diagrama de radiação em 2D para $\phi=0$ da antena de microfita com estrutura DGS(um elemento).	54
46	Diagrama de radiação em 2D para $\phi=90$ da antena de microfita com estrutura DGS(um elemento).	55
47	Frequência de ressonância \times Comprimento da matrioska aberta.	56
48	Frequência de ressonância \times Diâmetro do SRR.	56
49	Frequência de ressonância \times Dimensão do elemento.	57
50	Desenho da antena com estrutura DGS(quatro elementos).	58
51	Resposta em frequência da antena com estrutura DGS(quatro elementos).	59
52	Diagrama de radiação em 3D da antena com estrutura DGS(quatro elementos).	59
53	Diagrama de radiação em 2D para $\phi=0$ da antena de microfita com estrutura DGS(quatro elementos).	60
54	Diagrama de radiação em 2D para $\phi=90$ da antena de microfita com estrutura DGS(quatro elementos).	60

Lista de Tabelas

1	Comparação entre os métodos de alimentação da antena de microfita.	21
2	Dimensões das antenas de microfita retangulares.	36
3	Dimensões do elemento de geometria matrioska fechada.	38
4	Dimensões do elemento SRR.	39
5	Dimensões da antena e da estrutura DGS ($f_r = 3$ GHz).	40
6	Dimensões da antena de 3 GHz e elemento de 2,5 GHz.	42
7	Parâmetros da antena($f_r = 3$ GHz) com estrutura DGS.	43
8	Dimensões da antena de 2,5 GHz com estrutura DGS.	45
9	Parâmetros da antena com estruturas DGS de dimensões equivalentes.	48
10	Dimensões da antena com estrutura DGS (um elemento).	52
11	Parâmetros da antena com estrutura DGS(um elemento).	55
12	Dimensões da antena com estrutura DGS(quatro elementos).	58
13	Parâmetros da antena com estrutura DGS(quatro elementos).	61

Sumário

1	Introdução	14
1.1	Objetivo Geral . . . . .	.16
1.1.1	Objetivos Específicos . . . . .	.17
1.2	Estrutura do Texto . . . . .	.17
2	Antenas	18
2.1	Antenas Planares . . . . .	.18
2.2	Dimensionamento das Antenas de Microfita . . . . .	.20
2.3	Métodos de Alimentação das Antenas de Microfita . . . . .	.21
2.4	Vantagens e Desvantagens das Antenas de Microfita . . . . .	.23
3	Defect Ground Structure (DGS)	24
3.1	DGS baseado no <i>Split Ring Resonator (SRR)</i> . . . . .	.27
3.2	DGS baseado na geometria matrioska . . . . .	.29
4	Descrição do Projeto	33
4.1	Elemento de Geometria Matrioska . . . . .	.33
4.2	Antena de Microfita com Estrutura DGS . . . . .	.33
4.3	Caracterização Numérica . . . . .	.35
4.4	Caracterização Experimental . . . . .	.35
5	Resultados	36
5.1	Antena de Microfita com <i>Patch</i> Retangular . . . . .	.36
5.2	Elementos de Geometrias Matrioska Fechada e SRR ($f_r = 2,5$ GHz) . . . . .	.37
5.3	Antena de Microfita com <i>Patch</i> Retangular com DGS Baseado na Geometria Matrioska Fechada e no SRR ($f_{Antena} = 3$ GHz) . . . . .	.40
5.4	Antena Planar com Estruturas DGS de Dimensões Equivalentes ($f_{Antena} = 2,5$ GHz) . . . . .	.44
5.5	Antena de Microfita com Estrutura DGS Baseada na Geometria Matrioska Aberta e no SRR ($f_{Antena} = 3,5$ GHz; $f_{Elemento} = 2,6$ GHz; $f_{Conjunto} = 2,5$ GHz)	50

- 5.5.1 Antena com Estrutura DGS (Um Elemento), $f_{Conjunto} = 2,5 \text{ GHz}$. .51
- 5.5.2 Antena com Estrutura DGS (Quatro Elementos), $f_{Conjunto} = 2,5\text{GHz}$ 57

6	Considerações Finais	62
6.1	Trabalhos Futuros	63
6.2	Trabalhos Publicados	63

1 Introdução

Nas últimas décadas, tem crescido expressivamente o setor de comunicação sem fio (*wireless communication systems*), devido às várias vantagens oferecidas por esses tipos de sistemas de comunicação, tais como: facilidade de acesso, diversidade de serviços e aplicações, e mobilidade do usuário para se conectar com uma rede local (Sachs J.; Wallstedt 2019).

Com todo esse crescimento na área de telecomunicações com o uso das tecnologias de comunicação sem fio, passou-se a investir cada vez mais em dispositivos compactos, leves, com um custo acessível e sem perda de desempenho (Hussain R.; Alreshaid 2017).

Atualmente, os sistemas de comunicação sem fio passaram a fazer parte das atividades humanas como algo quase que natural. As aplicações dos sistemas de comunicação sem fio estão nos *smartphones*, no uso de veículos não tripulados, drones, e a evolução da tecnologia IoT, Internet das Coisas (*Internet of Things*), o que impõem constantemente novos desafios tecnológicos (Dai H.-N.; Wang 2019).

Devido ao crescente desenvolvimento de novas tecnologias envolvendo circuitos integrados, tem-se a necessidade de dispositivos de tamanho reduzido e de elevado desempenho. Com essa tendência de crescimento, algumas características dos novos dispositivos para uso em sistemas de comunicação sem fio, devem ser analisadas de maneira a acompanhar esse desenvolvimento (Gottardi G.; Oliveri 2018).

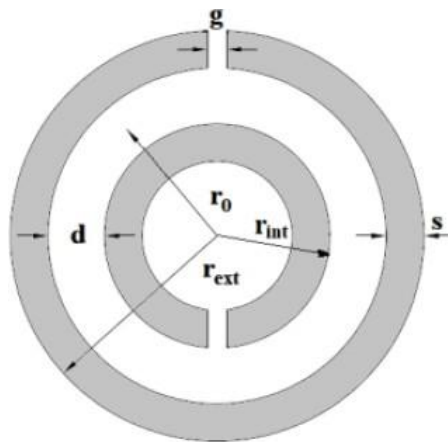
Nos sistemas de comunicações atuais as antenas são dispositivos essenciais na comunicação sem fio, onde a portabilidade passou a ser um requisito padrão nos mais diversos tipos de equipamentos eletrônicos (Patel U.; Upadhyaya 2019).

Devido a todo o crescimento dos sistemas de comunicações sem fio, existe um grande interesse prático que as antenas apresentem pequenas dimensões, banda larga e alta eficiência de radiação (Seko 2013). A primeira característica é consequência da tendência de produção e consumo de dispositivos cada vez mais compactos. Para os sinais que possuem bastante informação faz-se necessário que os elementos radiantes apresentem uma banda larga. A alta eficiência é um parâmetro importante nas situações onde se tem limitação da fonte de energia, já que quanto maior eficiência da antena menor será o consumo de energia do sistema (Costa 2006).

As antenas de microfita são adequadas para a transmissão e a recepção na faixa de micro-ondas, e devido à necessidade atual dos equipamentos de comunicações serem cada vez mais compactos, um aspecto desejável para esse tipo de antena tem sido a miniaturização. Dessa forma, tem sido desenvolvidas técnicas capazes de alterar a sua estrutura de maneira que resulte na redução do tamanho. Uma dessas técnicas tem sido a incorporação de estruturas DGS (do inglês *Defect Ground Structure*) (Arya A. K.; Kartikeyan 2010).

A aplicação da estrutura DGS em antena de microfita é feita através da inserção de uma "falha" intencional no plano de terra da antena, para melhorar o seu desempenho, podendo essa "falha" ser baseada em diferentes geometrias. Pesquisas já tem sido desenvolvidas utilizando estruturas DGS baseadas nos anéis circulares repartidos (SRR, *Split Ring Resonator*). Esse elemento, o SRR, foi sugerido por (Pendry 1999), é um tipo de estrutura artificial e consiste em dois anéis concêntricos repartidos, como mostra a Figura 1, que podem apresentar de forma simultânea a permissividade elétrica e a permeabilidade magnética negativas.

Figura 1: Célula de ressonador de anéis repartidos.



Fonte: (Castro 2014)

Uma proposta de geometria que tem sido desenvolvida em trabalhos recentes no GTEMA/IFPB, Grupo de Telecomunicações e Eletromagnetismo Aplicado, tem sido a geometria matrioska, que foi desenvolvida aplicando a ideia das bonecas matrioska (Ferreira 2014), Figura 2, as quais são constituídas por uma série de bonecas colocadas umas dentro das outras, expandindo-se da mais externa (maior) até a mais interna (menor) ocupando apenas o

volume da boneca mais externa (Cruz 2015).

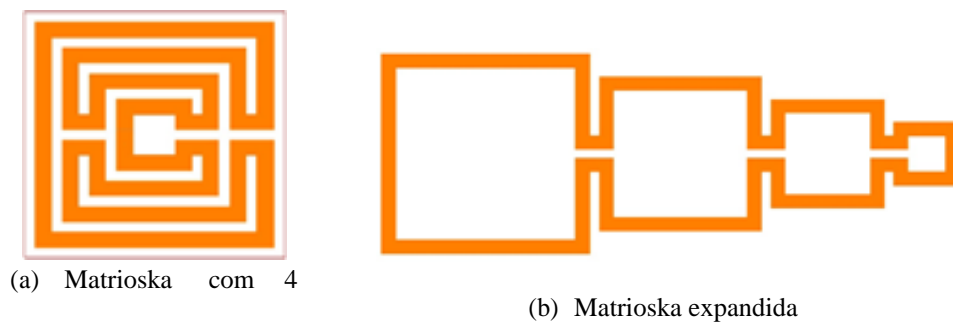
Figura 2: Exemplo de bonecas matrioska.



Fonte: (Hurber 2011)

Na geometria matrioska, diferente dos anéis concêntricos, os anéis permanecem interligados, formando um único anel, Figura 3, aumentando o seu comprimento efetivo e, conseqüentemente, reduzindo a frequência de ressonância.

Figura 3: Geometria matrioska.



(a) Matrioska com 4

(b) Matrioska expandida

âneos

Fonte: (Cruz 2015).

1.1 Objetivo Geral

O objetivo deste trabalho é investigar os efeitos causados por estruturas DGS de geometria matrioska, fechada e aberta, e SRR nas antenas de microfita com *patch* retangular,

analisando quais os parâmetros são afetados e de que forma são alterados. De maneira mais específica, serão analisadas as modificações na frequência de ressonância e no diagrama de radiação das antenas devido à inserção das estruturas DGS, verificando a possibilidade de obter uma miniaturização da antena após a inclusão dessas estruturas.

1.1.1 Objetivos Específicos

- Projetar a(s) antena(s) e estruturas DGS baseados na geometria matrioska e no SRR que operem na faixa de frequência de 2,5 GHz;
- Realizar a incorporação da estrutura DGS baseada na geometria matrioska no plano de terra da(s) antena(s) de microfita;
- Fazer uma análise dos resultados numéricos e experimentais obtidos e investigar os efeitos da estrutura DGS baseada na geometria matrioska nos parâmetros da antena de microfita, verificando a possibilidade de miniaturização;
- Comparar os resultados obtidos para as antenas de microfita com estrutura DGS baseada na geometria matrioska com os obtidos para as mesmas antenas com estrutura DGS baseada no SRR.
- Definir as vantagens e desvantagens das estruturas DGS estudadas quando aplicadas às antenas de microfita;
- Determinar, entre as configurações estudadas, a melhor configuração em relação ao número de elementos e sua localização na estruturas DGS;

1.2 Estrutura do Texto

No Capítulo 2 são apresentadas as características e aplicações da antena de microfita. No Capítulo 3 é abordada a estrutura DGS (*Defect Ground Structure*), e sua aplicação quando baseada no *Split Ring Resonator* (SRR) e na geometria matrioska. No Capítulo 4 é descrito o desenvolvimentos das antenas com estruturas DGS propostas neste trabalho. A apresentação e análise dos resultados preliminares estão no Capítulo 5. Finalizando, o Capítulo 6 contém as considerações finais do trabalho.

2 Antenas

As antenas são bastante utilizadas nas comunicações modernas. Elas são as responsáveis pela transformação de uma onda guiada de um circuito para uma onda não guiada no espaço, e vice-versa. Portanto as antenas servem como dispositivos de interface entre os circuitos e os meios de transmissão, nos quais os sinais de comunicação são irradiados na forma de ondas eletromagnéticas. Esses elementos são de extrema importância para o correto dimensionamento de uma rede de comunicação sem fio (Shivshankar T.; Navale 2014).

As antenas monopolo, dipolos e antenas de microfita apresentam baixos valores de ganho, contudo, em determinadas aplicações é necessário projetar antenas com alto ganho, como as Yagi-uda, parabólicas e antenas helicoidais, para atender aos requisitos de comunicação à longa distância (Kraus 1973). Em algumas situações é necessário mudá-lo, eletronicamente, para atender, com eficiência, aos requisitos de comunicação exigidos por alguns sistemas (Wang H.; Liu 2014).

2.1 Antenas Planares

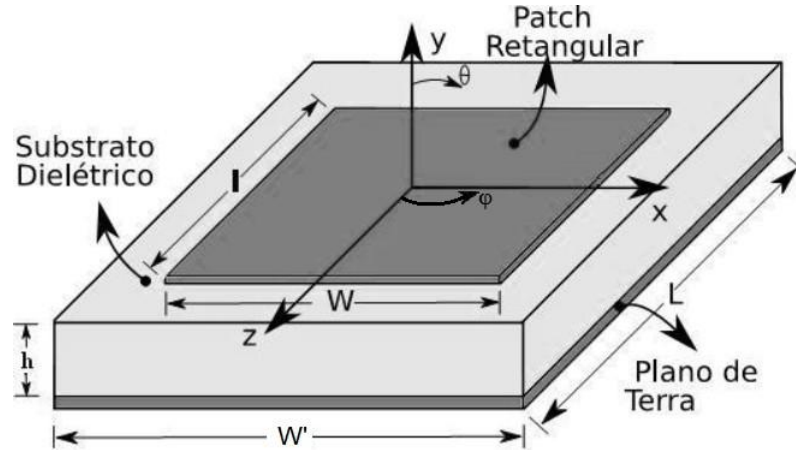
As antenas planares foram inicialmente propostas, no ano de 1953, por Deschamps (Deschamps 1953). Com todo o progresso que tem ocorrido com as tecnologias da comunicação sem fio e com todo o avanço dos circuitos integrados de micro-ondas, maiores exigências têm sido impostas no desenvolvimento de antenas planares, como as antenas de microfita (Yingzeng Y.; Na 2005).

Na década de 70, as pesquisas sobre as características das antenas planares ganharam força, e na década de 90 as pesquisas foram se intensificando com aplicações práticas. As antenas de microfita com dimensões reduzidas apresentam um excelente desempenho em uma estrutura leve (Li W. T.; Shi 2009).

A antena de microfita é formada, como mostra a Figura 4, basicamente por duas placas condutoras paralelas, onde há entre elas uma camada dielétrica chamada de substrato. Uma das placas representa o elemento irradiador, também chamado de “*patch*” radiante, enquanto que a outra é chamada de plano de terra. Existe também um alimentador, que pode ser implementado de diferentes maneiras, tais como: linha de microfita, cabo coaxial,

acoplamento por abertura e acoplamento por proximidade (Pozar D. M.; Schaubert 1995).

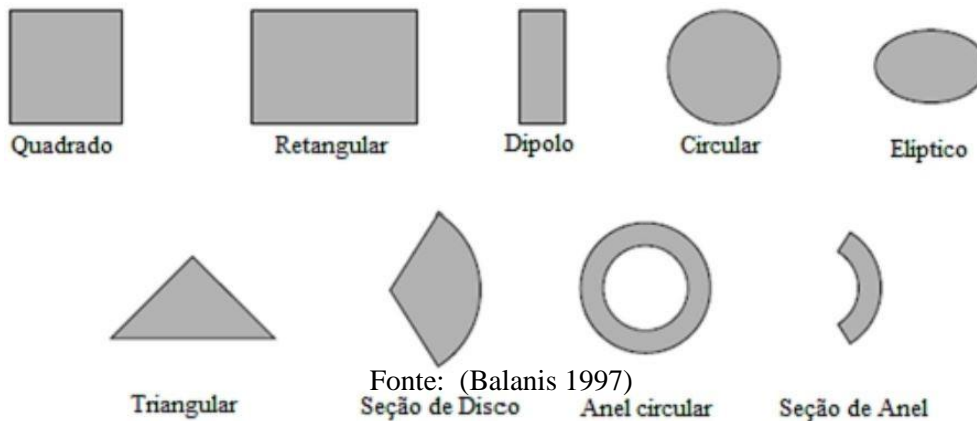
Figura 4: Antena de microfita.



Fonte: (Neto 2014)

O *patch* metálico apresenta uma espessura muito menor que o comprimento de onda no espaço livre e pode apresentar diferentes formas geométricas, como por exemplo: quadrado, retangular, circular, elíptica, triangular, entre outras, conforme está ilustrado na Figura 5. Para cada forma geométrica do *patch* há uma modelagem matemática para análise. Dessa forma, a geometria do elemento radiante atua de maneira direta na definição da distribuição de corrente e conseqüentemente na distribuição dos campos na superfície da antena (Silva 2015).

Figura 5: Exemplo de algumas formas geométricas para *patch* de antenas de microfita.



Fonte: (Balanis 1997)

O substrato de antenas de microfita pode ser de diversos materiais, possuindo geralmente uma permissividade relativa entre os valores de $2,2 \leq \epsilon_r \leq 12$, e sua espessura é muito menor que o comprimento de onda guiado. A combinação de um valor baixo dessa constante dielétrica com o substrato espesso, resulta em uma maior eficiência de radiação no espaço (Balanis 1997).

O plano de terra é composto de modo semelhante ao *patch* radiante e está localizado na face inferior do substrato da antena. A função dessa camada é refletir o sinal emitido pelo *patch* radiante, evitando assim a formação de um lóbulo traseiro mais forte, sendo também utilizado como um mecanismo de aterramento. Para facilitar os cálculos dos parâmetros que caracterizam o comportamento da antena é considerado geralmente essa camada como tendo dimensões infinitas. Bons resultados estão sendo obtidos com as modificações realizadas nesse elemento, como por exemplo, o truncamento do plano de terra gera um aumento na largura de banda da antena (Barros 2012).

2.2 Dimensionamento das Antenas de Microfita

Para obter as dimensões de uma antena de microfita com *patch* que tenha geometria retangular utilizam-se as equações que serão descritas a seguir. Para encontrar a largura W da antena, utiliza-se a Equação 1, cujos parâmetros que precisam ser considerados são: v_0 , é a velocidade da luz no espaço livre, f_r , é a frequência de ressonância da antena, e ϵ_r , é a constante dielétrica do substrato (Balanis 1997).

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

A constante dielétrica efetiva do substrato é determinada pela Equação 2, onde h é a altura do substrato.

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

Para obter o ΔL , que é o comprimento incremental de extensão devido ao efeito de franjamento, utiliza-se a Equação 3. Essa variação será considerada para o cálculo do comprimento elétrico do *patch*.

$$\frac{\Delta L}{h} = 0,412 \cdot \frac{(\epsilon_{ref} + 3) \cdot (\frac{W}{h} + 0,264)}{(\epsilon_{ref} - 0,258) \cdot (\frac{W}{h} + 0,8)} \quad (3)$$

Com a Equação 4 é determinado o comprimento do *patch*, desconsiderando o efeito de franjeamento.

$$L = \frac{v_0}{r \cdot \epsilon_{ref} \cdot f} \cdot 2\Delta L \quad (4)$$

2.3 Métodos de Alimentação das Antenas de Microfita

Para alimentar o *patch* podem ser utilizados diferentes métodos, sendo os principais através de cabo coaxial, linha de microfita, acoplamento por abertura e acoplamento por proximidade (Pozar D. M.; Schaubert 1995). Na Tabela 1 é feita uma comparação entre os métodos citados para alimentar a antena de microfita.

Tabela 1: Comparação entre os métodos de alimentação da antena de microfita.

Características	Linha de Microfita	Cabo Coaxial	Acoplamento por Abertura	Acoplamento por Proximidade
Espúrios de Radiação	Maior	Maior	Menor	Médio
Confiabilidade	Ótima	Boa (depende da solda)	Boa	Boa
Fabricação	Fácil	Fácil	Difícil	Difícil
Casamento de Impedância	Fácil	Fácil	Fácil	Fácil
Largura de Banda	2-5%	2-5%	2-5%	2-5%

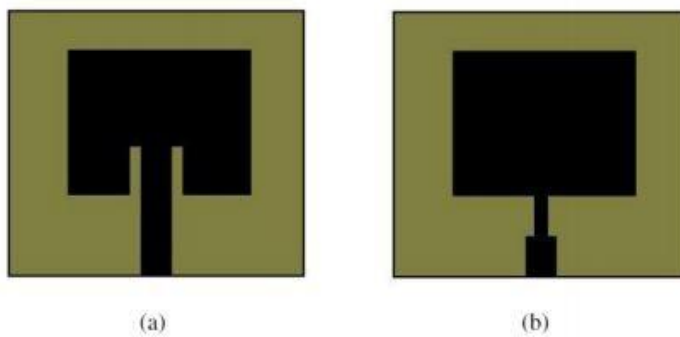
Fonte: (Bahl J.; Bhartia 1980)

A alimentação do *patch* por linha de microfita é feita por um condutor que possui uma largura muito menor que a do *patch* e que é de fácil fabricação. A medida que a espessura do substrato aumenta ocorre um incremento nas ondas de superfícies e na radiação de espúrios devido à alimentação, o que gera uma limitação em aplicações que necessitam de banda larga (Balanis 1997).

Como mostra a Tabela 1, a alimentação por linha de microfita é de fácil projeto e fabricação e de simples casamento de impedância, que pode ser realizado através das técnicas

de *inset-fed* e de transformador de $\lambda/4$. Na Figura 6 é ilustrado esse tipo de alimentação com as duas técnicas para casamento de impedância.

Figura 6: Alimentação por linha de alta impedância. (a) uso de *inset-fed*. (b) transformador de $\lambda/4$.



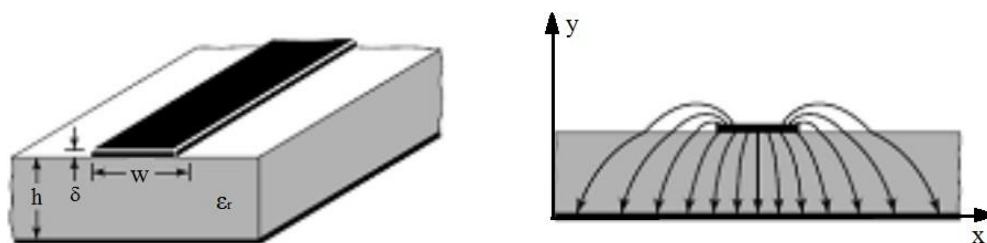
Fonte: (Barros 2012)

Na técnica *inset-fed*, a impedância de entrada da alimentação da antena depende principalmente do comprimento da reentrância em relação ao comprimento do elemento irradiador. Variações no comprimento e na largura da reentrância produzem alterações na frequência de ressonância (Silva 2014). Na técnica com transformador de quarto de onda, são projetadas duas seções de linha de comprimento igual a um quarto do comprimento de onda guiado; a largura da linha é obtida a partir de sua impedância característica com o auxílio de *softwares*, tais como o APPCad. Também existe a técnica híbrida, que é uma outra técnica originada da junção das duas técnicas mencionadas.

Para a análise das antenas de microfita são utilizados vários modelos matemáticos, sendo o método da linha de transmissão um dos mais simples. Tendo como característica a consideração dos efeitos de borda, causados pelo fato do *patch* possuir dimensões finitas, o que ocasiona um aumento nos valores efetivos do comprimento e da largura do *patch*.

Na Figura 7, pode ser visto o efeito de borda, ou efeito de franjamento, através do *patch* e substrato da antena. As dimensões da antena e a frequência de operação, do *patch* e substrato, são o que determinam a quantidade de franjamento. No plano x-y (plano E principal), o efeito de borda é em função do comprimento, espessura do substrato e permissividade relativa (Balanis 1997).

Figura 7: (a) Linha de microfita na vista isométrica (b) Vista frontal das linhas de campo elétrico.



Fonte: (Balanis 1997)

2.4 Vantagens e Desvantagens das Antenas de Microfita

Em comparação com as antenas convencionais utilizadas para a faixa de frequência de micro-ondas, as antenas de microfita apresentam vantagens (Neto 2014), tais como:

- Baixo peso e pequena espessura;
- Com alimentação simples são possíveis polarizações lineares e circulares;
- São facilmente agregadas a circuitos integrados de micro-ondas;
- Possibilidade de fabricar redes de casamento de impedância e linhas de alimentação simultaneamente com a estrutura da antena.

Em comparação com os demais tipos de antenas lineares, as antenas de microfita possuem as seguintes desvantagens (Filho 2010):

- Limitação da largura de banda;
- Baixa eficiência de radiação se construídas em substratos com constantes dielétricas elevadas;
- Baixo ganho;
- Excitação de onda de superfície;
- Radiação de espúrios por parte das linhas de alimentação e junções e em apenas um hemisfério.

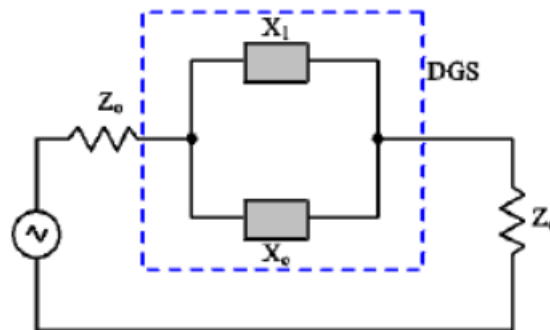
3 Defect Ground Structure (DGS)

Existem inúmeras técnicas utilizadas para aprimorar os parâmetros das antenas de microfita, seja usando empilhamento, diferentes técnicas de alimentação, Superfícies Seletivas em Frequência (FSS), *Electromagnetic Band Gap* (EBG), *Photonic Band Gap* (PBG) ou Metamaterial. Diante de todas essas técnicas o Defeito no Plano de Terra (DGS) tem se destacado sendo a mais popular para aprimorar os parâmetros, devido ao seu projeto estrutural ser simples (Park I.; Khandelwal 2017).

Os *slots* geométricos embutidos no plano de terra dos circuitos de micro-ondas são denominados DGS (*Defected Ground Structure*). Um único defeito (célula unitária) ou um número de configurações periódicas e aperiódicas de defeitos pode estar incluído no DGS (Park I.; Khandelwal 2017).

(Park J. I.; Kim 1999) fez a primeira publicação de defeitos inseridos no plano de terra, sendo na época a estrutura considerada como uma nova proposta de *Photonic Band Gap* (PBG). Esse trabalho apresentou a modelagem do circuito LC equivalente, da Figura 8, o que foi de grande importância para as pesquisas posteriores, que foram desenvolvidas com o intuito de analisar alterações na capacitância e indutância apresentada.

Figura 8: Circuito equivalente LC da estrutura DGS.

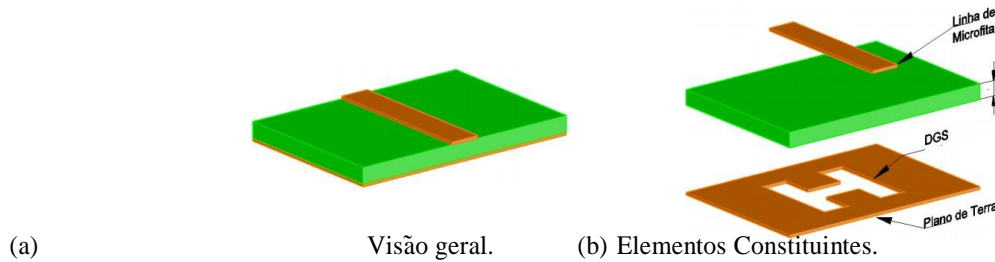


Fonte: (Park J. I.; Kim 1999), (Sena 2018)

Através de um estudo paramétrico do defeito em forma de alteres retangular, semelhante ao apresentado na Figura 9, o termo DGS foi introduzido pela primeira vez, onde o principal intuito foi de analisar o impacto das dimensões físicas causadas pelos defeitos na capacitância e indutância do circuito LC da Figura 8 (Kim C.-S.; Park 2000),

(Lim J.-S; Kim 2000).

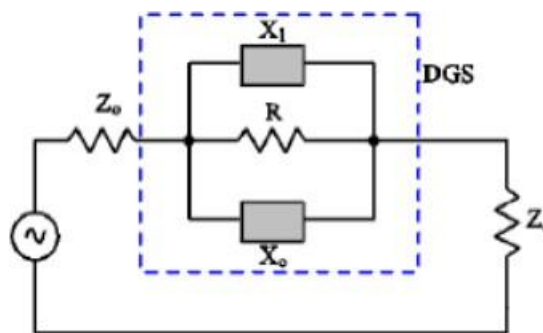
Figura 9: Linha de microfita com estrutura DGS em forma de alteres retangular.



Fonte: (Sena 2018), (Park J. I.; Kim 1999)

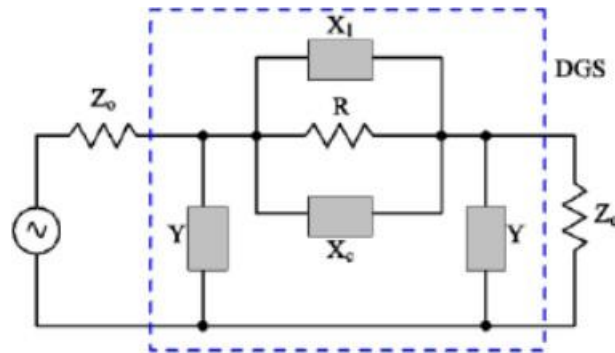
Em 2002, avanços ocorrem nas pesquisas com o circuito equivalente das estruturas DGS. Para a representação da perda de radiação foi adicionada uma resistência R em paralelo com o circuito LC, tornando o circuito equivalente RLC como mostra a Figura 10. Outra consideração foi a modelagem do campo de frangeamento que existe entre o elemento radiador e o plano de terra, representada pela adição de admitâncias *shunt* ao circuito. Essa nova configuração foi nomeada como modelo π e é representada na Figura 11.

Figura 10: Circuito equivalente RLC da estrutura DGS.



Fonte: (Sena 2018), (Park J.; Kim 2002)

Figura 11: Circuito equivalente π da estrutura DGS.

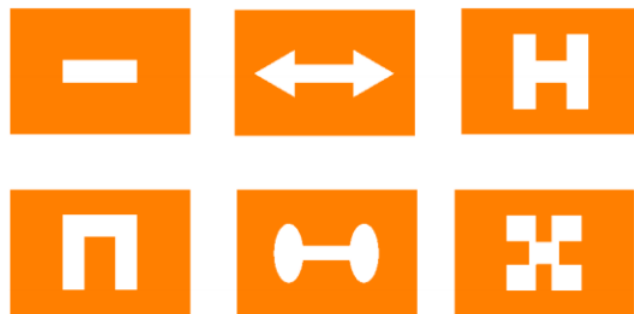


Fonte: (Sena 2018), (Chang I.; Lee 2002)

O modelo mais escolhido pela maioria dos autores estudados é o circuito ressonador RLC, em virtude de sua simplicidade e precisão aceitável, apesar do circuito π equivalente fornecer um bom detalhamento dos fenômenos físicos existente na estrutura DGS (Sena 2018).

Diferentes formas de célula única podem ser gravadas no plano de terra de uma antena de microfita, como mostra a Figura 12. De modo geral, as diferentes formas de estrutura DGS possuem as mesmas funções e características, tais como, por exemplo, rejeição de banda e miniaturização do tamanho da antena. Novos formatos de células únicas têm sido propostos, especialmente para circuitos de micro-ondas (Arya A. K.; Kartikeyan 2010).

Figura 12: Diferentes formatos de defeitos que podem ser gravados no plano de terra de uma antena de microfita.



Fonte: (Sena 2018)

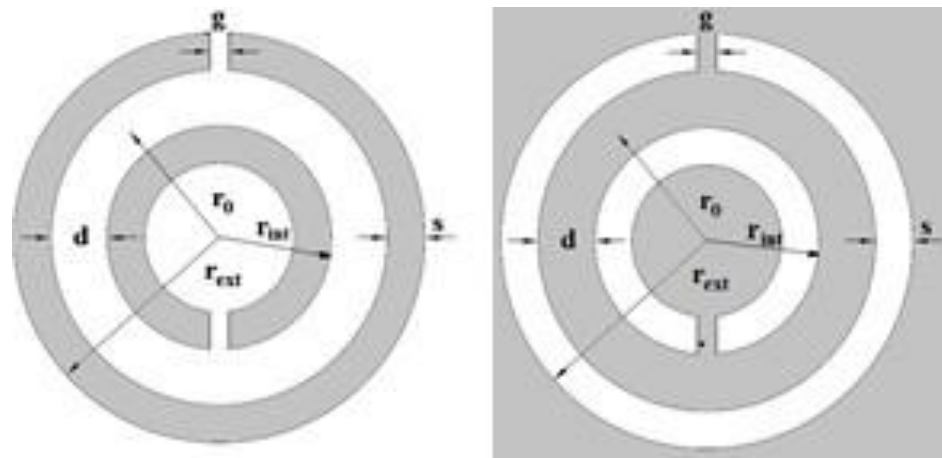
É através do plano de terra que ocorre a aplicação de uma estrutura DGS em uma antena de microfita, sendo que essa estrutura DGS pode assumir diferentes formatos. A falha intencional que é inserida no plano de terra, provoca uma perturbação na distribuição

de corrente da estrutura, podendo resultar na melhoria dos parâmetros da antena em que a DGS foi inserida (Ahn D.; Park 2001).

3.1 DGS baseado no *Split Ring Resonator* (SRR)

A estrutura SRR tem sido objeto de estudo por vários grupos de pesquisas juntamente com seu complemento CSRR, sendo essas duas estruturas ilustradas na Figura 13. Seu funcionamento é como pequenos dipolos magnéticos, que aumentam a resposta magnética do material empregado, que pode ser intensificada com uma maior quantidade de anéis (Luna D. R.; Neto 2013). Esse elemento exibe uma resposta magnética ressoante às ondas eletromagnéticas quando o vetor campo magnético for paralelo a essas estruturas (Moura 2015).

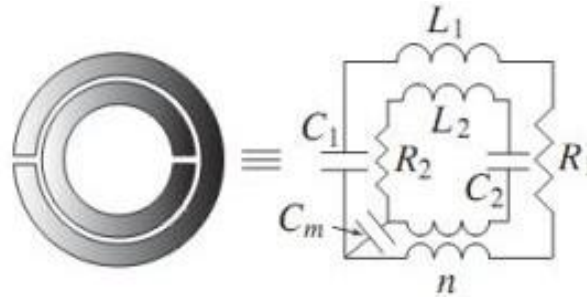
Figura 13: (a) Geometria SRR e (b) Geometria CSRR.



Fonte: (Luna D. R.; Neto 2013)

A Figura 14, mostra o circuito equivalente do SRR. Na configuração de anel duplo, o acoplamento capacitivo e indutivo entre os anéis são modelados por uma capacitância de acoplamento (C_m) e um transformador de razão n (Moura 2015).

Figura 14: Modelo de circuito equivalente do SRR.



Fonte: (Caloz C.; Itoh 2005)

Em (Marques R.; Mesa 2003) foi feita uma análise quase estática para se deduzir a indutância e capacitância do anéis. Considerando a complexidade das equações para calcular a capacitância e indutância dos anéis, neste trabalho foi utilizada a Equação 5, que é uma aproximação, para encontrar a ressonância do SRR projetado, onde v_0 é a velocidade da luz no vácuo e ϵ_{eff} é a constante dielétrica efetiva do substrato.

$$f = \frac{v_0}{2L\sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (5)$$

Com a Equação 6 encontra-se a variável L que é o comprimento do anel, sendo g o *gap*, s a largura do anel e r o raio externo ou interno do anel.

$$L = 2\pi \cdot \left(r - \frac{s}{2}\right) - g \quad (6)$$

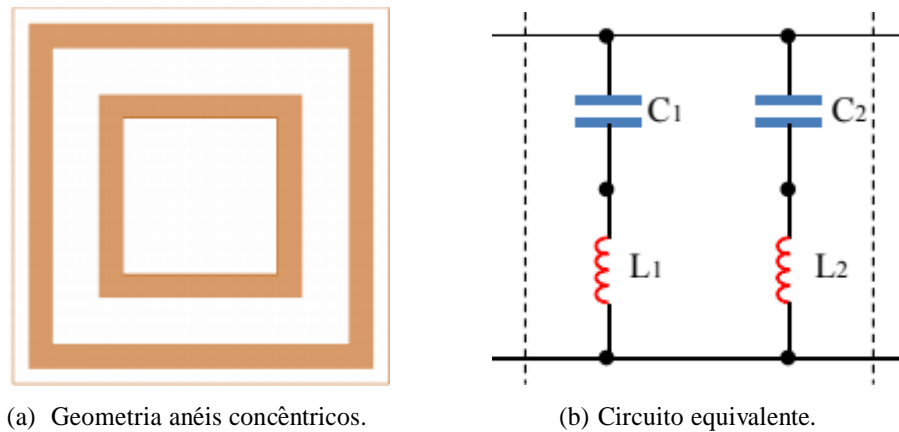
Trabalhos utilizando a estrutura DGS baseada em SRR já tem sido desenvolvidos por diversos pesquisadores. (Wu B.; Li 2006), investigou um circuito equivalente de um SRR aplicado como DGS que resultou em um filtro passa baixa do tipo *S-band*. Um trabalho mais atual foi de (Ajay V.; Parvathy 2019), que realizou um estudo utilizando antenas de microfita em aplicações com WiMAX, introduzido um arranjo de CSRRs como DGS em uma antena de microfita retangular, que obteve uma miniaturização da antena devido à redução da frequência após a inserção do arranjo de CSRRs como DGS, o que prova um bom desempenho dessa técnica.

3.2 DGS baseado na geometria matrioska

O diferencial dos ressoadores com geometria matrioska, é que os anéis são interligados, o que torna toda a estrutura um só anel, resultando em um aumento do comprimento efetivo final do elemento e possibilita a redução da frequência de ressonância e um comportamento multibanda.

O ponto de partida para esse tipo de estrutura são os anéis concêntricos, que são apresentados na Figura 15. Cada anel representa um circuito LC, ou seja, os dois anéis concêntricos quadrados ilustrados atuam semelhante a um duplo circuito LC.

Figura 15: Geometria anéis concêntricos e circuito LC equivalente.



(a) Geometria anéis concêntricos.

(b) Circuito equivalente.

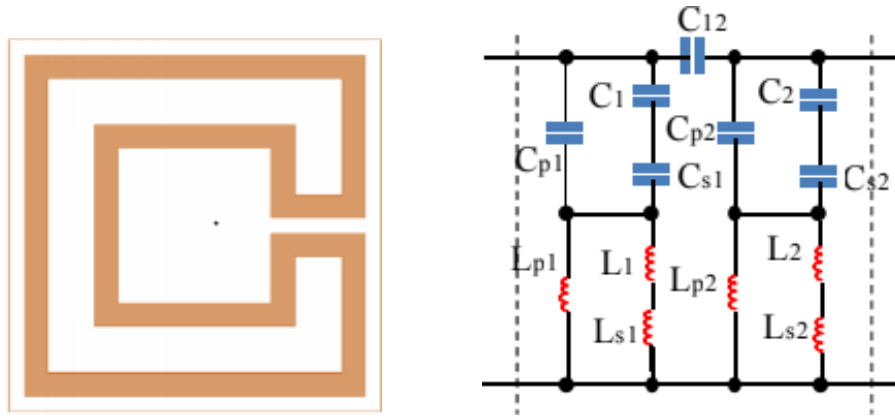
Fonte: (Ferreira 2014).

Quando ocorre a conexão dos anéis, elementos LC em série e paralelo são adicionados, como mostra a Figura 16. A modificação realizada ocasiona, na maioria dos elementos capacitivos e indutivos, uma dependência em relação a frequência e a polarização do campo incidente. Assim, a abordagem analítica para estabelecer as equações de circuito para esse novo modelo geométrico torna-se difícil, fazendo-se necessário o uso de métodos numéricos e da experiência de engenheiros.

O modelo dessa estrutura forma um único anel, apresentando um maior comprimento efetivo total sem aumentar a área total ocupada pela célula unitária.

Com um procedimento aproximado é possível estimar as duas primeiras frequências de ressonância dessa estrutura, já que há uma complexidade em obter essas frequências por meio dos métodos analíticos.

Figura 16: Geometria matrioska e seu circuito LC equivalente.



(a) Geometria matrioska. Fonte: (Ferreira 2014) (b) Circuito equivalente.

Considerando uma onda eletromagnética não estacionária, gerada por uma fonte oscilante, define-se a velocidade com que essa onda se propaga através da Equação 7, sendo f a frequência da onda e λ o seu comprimento.

$$v = f\lambda \quad (7)$$

Quando uma onda incide sobre a estrutura, a frequência de ressonância que se associa à geometria metálica sobre a sua superfície tem um comprimento de onda que é aproximadamente igual ao comprimento efetivo da própria estrutura ($\lambda \approx L_{efet}$).

Define-se o comprimento efetivo, L_{efet} , de uma estrutura com geometria matrioska como sendo o tamanho linear resultante da interação entre o campo incidente e a forma geométrica da camada metalizada. Ou seja, é o caminho circundado por onde o campo efetivamente se acomoda sobre a superfície da estrutura.

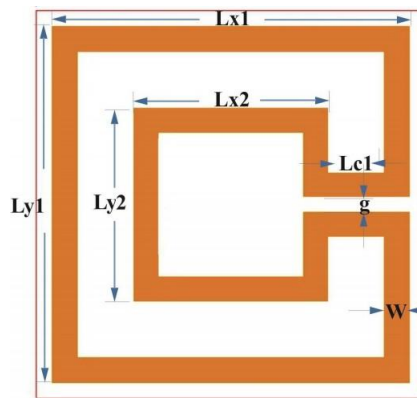
A Figura 17 apresenta as dimensões básicas da geometria matrioska. Sendo que a polarização do campo influencia no valor do comprimento L_{efet} da estrutura citada, como pode ser visto na Figura 18. Quando a polarização do campo ocorre na direção x, Figura 18 (a), não se tem a percepção da junção e abertura dos anéis pelo campo incidente, podendo ser calculado o comprimento pela Equação 8. Quando a polarização ocorre na direção y, Figura 18 (b), tem a percepção da conexão, bem como de toda a estrutura da geometria, o

que modifica o cálculo do comprimento para o apresentado na Equação 9 (Ferreira 2014).

$$L_{efet} = 4(Lx1 + Lx2) \quad (8)$$

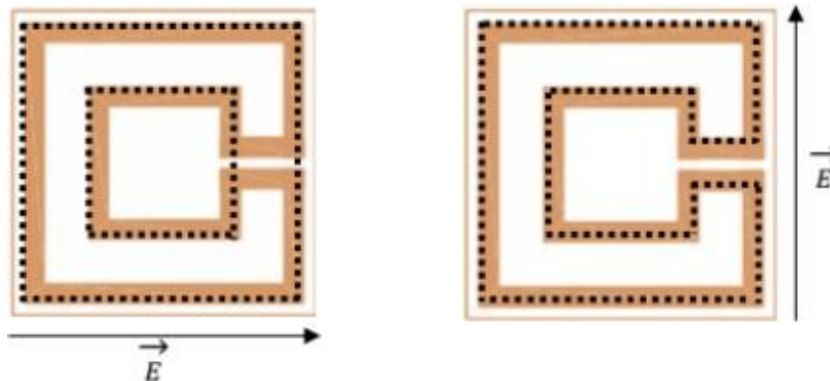
$$L_{efet} = 4(Lx1 + Lx2) - 2g + 2Lc1 \quad (9)$$

Figura 17: Dimensões básicas da geometria matrioska.



Fonte: (Cruz 2015)

Figura 18: Comprimento efetivo para uma geometria matrioska.



(a) Polarização do campo em x.

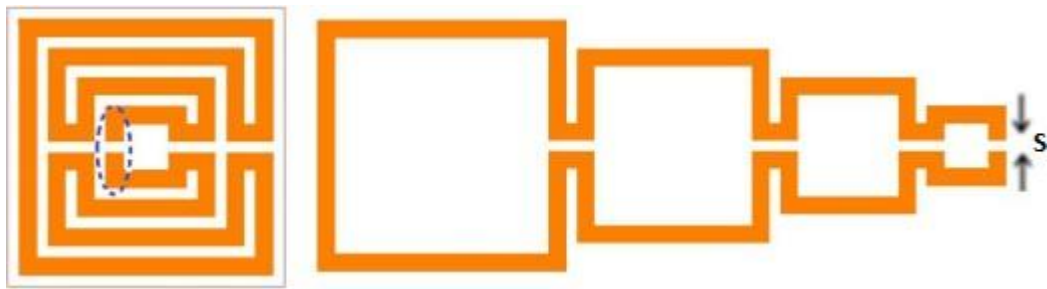
(b) Polarização do campo em y.

A matrioska com uma fenda em um determinado ponto da geometria, desenvolvida por (Cruz 2015) e apresentada na Figura 19, denominada de matrioska aberta, se comporta como um dipolo. Sua primeira frequência de ressonância será aproximadamente metade do valor obtido para a matrioska fechada, o que é uma característica muito interessante em aplicações

onde são necessárias estruturas com menores dimensões. Em relação a matrioska fechada, essas estruturas com abertura apresentam além de frequências de ressonâncias menores, um maior número de ressonâncias.

O tamanho da abertura, que é indicada como s , interfere na frequência de ressonância do elemento, de modo que a medida que aumenta essa abertura a frequência da estrutura é deslocada, aumentando seu valor.

Figura 19: Expandindo os anéis da geometria matrioska aberta com a fenda no anel interno.



Fonte: (Cruz 2015)

A geometria com dois anéis corresponde a um ressonador de meio comprimento de onda se estiver em aberto e com a polarização adequada, ou seja, $L_{efet} \approx \frac{\lambda}{2}$.

Após a utilização das equações descritas anteriormente para o cálculo das dimensões das estruturas matrioska fechada e aberta, ainda foi necessário utilizar um processo de parametrização, ou ajuste fino, nessas dimensões calculadas, de modo que as estruturas pudessem ressoar na frequência desejada.

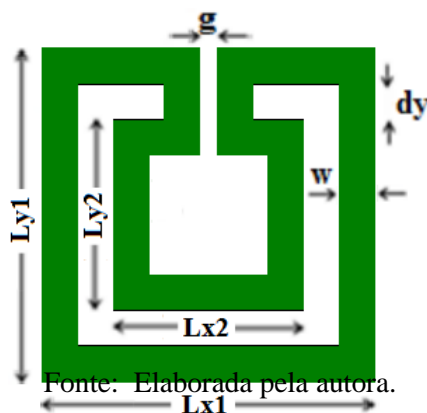
4 Descrição do Projeto

Neste capítulo é descrito o desenvolvimento do projeto, que teve como objetivo investigar o uso de estrutura DGS em forma de matrioska em antenas de microfita, verificando assim a possibilidade de miniaturização da antena.

4.1 Elemento de Geometria Matrioska

Inicialmente a geometria matrioska utilizada nessa dissertação é do tipo fechada, como mostra a Figura 20, sendo considerado o comprimento de onda igual ao comprimento efetivo, que tem variações relativas com a mudança da polarização. Em seguida foi usada como base a geometria matrioska aberta, que tem o comprimento efetivo como aproximadamente a metade do comprimento de onda. A abertura na geometria, que é localizada no anel mais interno, possibilita obter uma redução da área ocupada pelo elemento mantendo constante a frequência ressonância.

Figura 20: Elemento de geometria matrioska fechada no ANSYS Designer.



4.2 Antena de Microfita com Estrutura DGS

Este trabalho direcionou a investigação da miniaturização das antenas de microfita para as tecnologias 4G, Rádio Navegação e Rádio Localização, e 5G, que utilizam as frequências de 2,5 GHz, 3,0 GHz e 3,5 GHz, respectivamente.

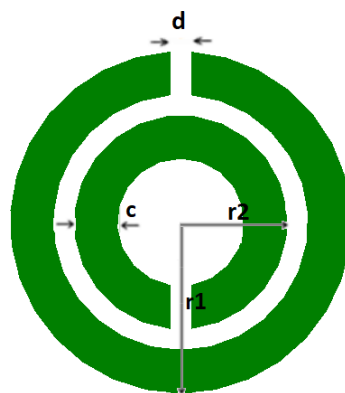
Foram projetadas, simuladas e construídas antenas de microfita de geometria retangular e estruturas DGS, considerando um substrato dielétrico do tipo FR-4, de altura $h = 1,6$ mm, com constante dielétrica de 4,4 e tangente de perdas de 0,02.

Inicialmente o DGS com geometria matrioska fechada foi inserido no plano de terra de uma antena de microfita, onde o DGS e a antena ressoam em 3 GHz. Foram investigadas as alterações dos parâmetros da antena, comparando com os parâmetros da antena convencional. Também foi verificado o efeito ocasionado nos parâmetros da antena pela redução da frequência de ressonância da estrutura DGS para 2,5 GHz.

Em seguida, foi realizada uma comparação da antena de frequência de ressonância de 2,5 GHz com estruturas DGS baseada na geometria matrioska fechada e com estrutura DGS em forma de SRR, onde, em ambos os casos, os elementos que constituem as estruturas DGS possuem mesmo tamanho.

O SRR, como mostra a Figura 21, é formado por dois anéis concêntricos e foi escolhido para ser comparado com a geometria matrioska devido já ter várias pesquisas desenvolvidas caracterizando seu comportamento. Dessa forma, considerando a mesma área ocupada da estrutura DGS para ambas geometrias são analisados a frequência de ressonância, coeficiente de reflexão e ganho das antenas.

Figura 21: Desenho do elemento SRR no ANSYS Designer.



Fonte: Elaborada pela autora.

Logo em seguida foi utilizada a estrutura com geometria matrioska aberta, que se comporta como um dipolo de meio comprimento de onda, em que a frequência de ressonância obtida é a metade da frequência da matrioska fechada.

Foram utilizadas antenas de microfita, que ressoam em 3,5 GHz, com estruturas DGS baseadas em geometrias matrioska aberta e SRR que ressoam em 2,6 GHz, havendo uma variação no número e na localização desses elementos no plano de terra da antena. Para isso foram utilizadas estruturas com um e quatro elementos de geometria matrioska aberta e SRR.

4.3 Caracterização Numérica

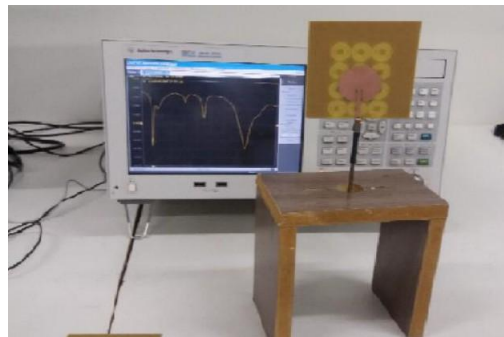
A caracterização numérica foi realizada utilizando o *software* ANSYS Designer, sendo os parâmetros analisados e ajustados conforme a necessidade do projeto. Como ênfase, foram observadas, principalmente, as mudanças na frequência de ressonância, coeficiente de reflexão e do diagrama de radiação das antenas.

4.4 Caracterização Experimental

Após feita a caracterização numérica as antenas de microfita com estruturas DGS foram fabricadas e caracterizadas experimentalmente, e os resultados obtidos foram comparados com os obtidos numericamente.

Neste trabalho a análise experimental foi realizada utilizando um analisador de redes Agilent E5071C (Figura 22), submetendo as antenas com plano de terra convencional e com estrutura DGS a esta etapa. A etapa de análise experimental consistiu em medir e analisar frequência de ressonância das antenas. As medições foram realizadas no Laboratório de Medidas em Telecomunicações do IFPB, sob a supervisão do orientador deste trabalho.

Figura 22: Ilustração do *setup* de medição utilizando o analisador de redes Agilent E5071C.



Fonte: (Souto 2019)

5 Resultados

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos com as simulações e medições das antenas de microfita com estruturas DGS baseada na geometria matrioska e no SRR, analisando os efeitos ocasionados por essas estruturas nos parâmetros da antena. Sendo utilizado para projeto as frequências de 2,5 GHz, 3 GHz e 3,5 GHz, que são as frequências utilizadas pelos serviços de quarta geração (4G), radionavegação e quinta geração (5G), respectivamente (ANATEL 2020).

5.1 Antena de Microfita com *Patch* Retangular

Para o projeto da antena de microfita com *patch* retangular foi utilizado o substrato FR4, com constante dielétrica igual a 4,4, altura de 1,6 mm e tangente de perdas igual a 0,02. Os dimensionamentos das antenas para as frequências de ressonância de 2,5, 3 e 3,5 GHz foram realizados com as Equações apresentadas no Capítulo 2, sendo calculada a linha de alimentação da antena através do *software* AppCAD, considerando uma impedância de 50 Ω . As dimensões para essas antenas estão listadas na Tabela 2.

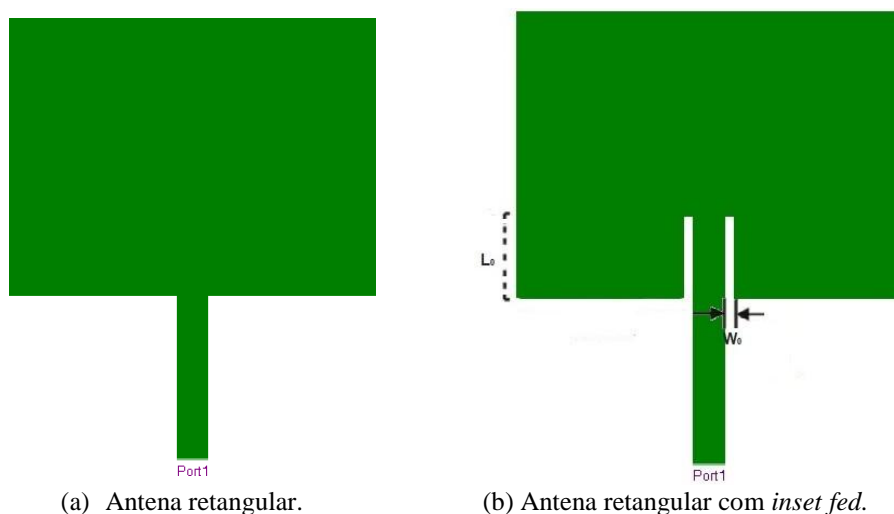
Tabela 2: Dimensões das antenas de microfita retangulares.

Antena Retangular ($f_r = 2,5\text{GHz}$)	
W	37 mm
L	27,8 mm
Antena Retangular ($f_r = 3\text{GHz}$)	
W	31 mm
L	24 mm
Antena Retangular ($f_r = 3,5\text{GHz}$)	
W	28 mm
L	20 mm
Linha de Alimentação ($Z_0 = 50\Omega$)	
W_L	2,8 mm
Inset-fed	
W_0	1 mm
L_0	8 mm

Com os valores das dimensões das antenas de microfita foram realizados os desenhos da Figura 23 e a simulação no *software* ANSYS Designer. Para aumentar a eficiência das antenas

de microfita foi realizado o casamento de impedância utilizando-se a técnica de *inset-fed*, com os valores das aberturas mostrados na Tabela 2. Em seguida, as antenas foram confeccionadas para serem realizadas as medições.

Figura 23: Antena de microfita retangular.



Fonte: (Santos 2018)

5.2 Elementos de Geometrias Matrioska Fechada e SRR ($f_r = 2,5$ GHz)

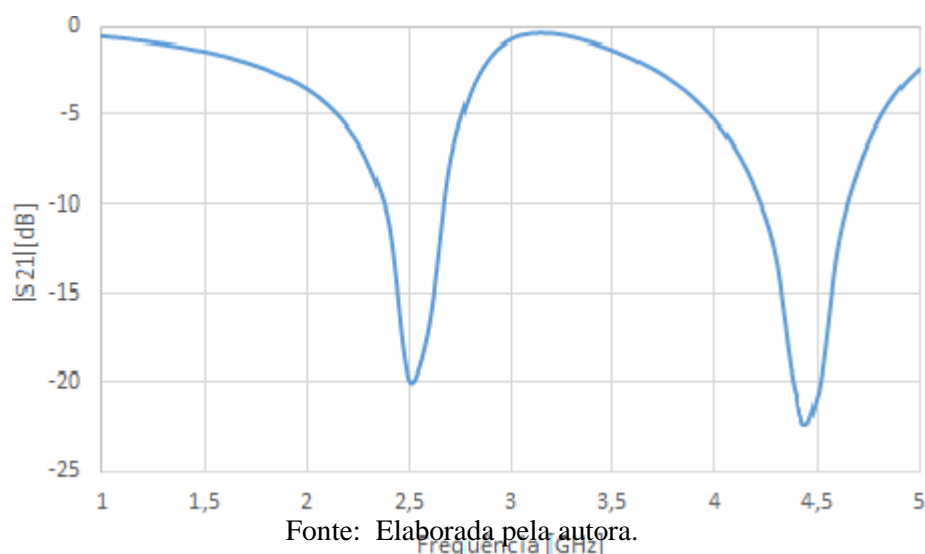
Para atestar o comportamento da estrutura de geometria matrioska fechada apresentada na Seção 3.2, foi realizado seu projeto para ressoar na frequência de 2,5 GHz. As dimensões desse elemento são mostradas na Figura 20 e foram obtidas conforme as equações apresentadas na Seção 3.2. Após as simulações realizadas utilizando-se o *software* ANSYS Designer foi preciso realizar uma otimização paramétrica para obter a frequência de ressonância igual a 2,5 GHz. As dimensões calculadas e simuladas da estrutura estão apresentadas na Tabela 3, considerando $Lx1 = Ly1$ e $Lx2 = Ly2$.

Tabela 3: Dimensões do elemento de geometria matrioska fechada.

	Valor Calculado	Valor Simulado
Lx1	18,7 mm	17,2 mm
Lx2	10,7 mm	9,2 mm
Lc1	2 mm	2 mm
g	1 mm	1 mm
w	2 mm	2 mm
$f_{r(calculada)}$	2,5 GHz	2,8 GHz
$f_{r(simulada)}$	2,1 GHz	2,5 GHz

Após o dimensionamento correto desse elemento foi realizado o seu desenho e a simulação como uma FSS, considerando a célula unitária de $20\text{mm} \times 20\text{mm}$, a faixa de frequência foi de 1 a 5 GHz, a polarização em y e a resposta em frequência obtida é vista na Figura 24. Na simulação a frequência de ressonância obtida considerando os valores calculados para a geometria matrioska fechada foi de 2,1 GHz, por isso foi necessário realizar uma redução nas medidas obtidas com as equações apresentadas para que a FSS ressoasse em 2,5 GHz, o comprimento efetivo considerado foi de 99,6 mm e o s_{ref} de 1,42.

Figura 24: Resposta em frequência do elemento de geometria matrioska fechada - ANSYS Designer.

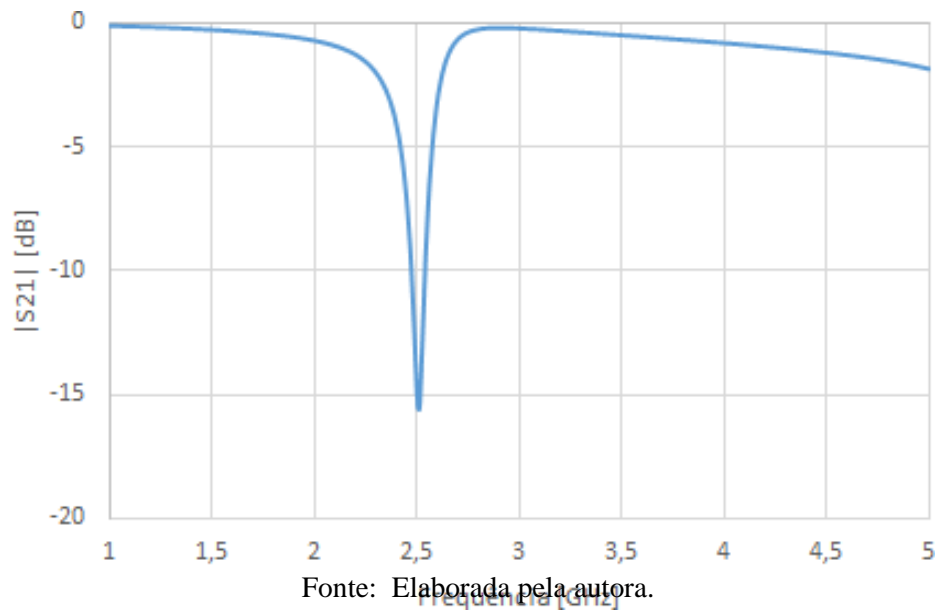


Também foi projetado um elemento SRR para a frequência de ressonância de 2,5 GHz, sendo necessário realizar ajustes nas dimensões calculadas, pois a frequência obtida com os valores calculados foi de 1,98 GHz. A simulação desse elemento como uma FSS foi realizada considerando as mesmas condições da matrioska fechada, sendo o intervalo de frequências de 1 a 5 GHz, as dimensões da célula unitária de 20mm × 20mm, e a polarização considerada foi em y. Essa estrutura será utilizada mais à frente para comparação com a estrutura de geometria matrioska. As dimensões do elemento SRR estão indicadas na Tabela 4 e a resposta em frequência apresentada na Figura 25.

Tabela 4: Dimensões do elemento SRR.

	Valor Calculado	Valor Simulado
r1	8,3 mm	7 mm
r2	5,3 mm	4 mm
c	2 mm	2 mm
d	1 mm	1 mm
$f_{r(calculada)}$	2,5 GHz	2,9 GHz
$f_{r(simulada)}$	1,98 GHz	2,5 GHz

Figura 25: Resposta em Frequência do elemento SRR - ANSYS Designer.



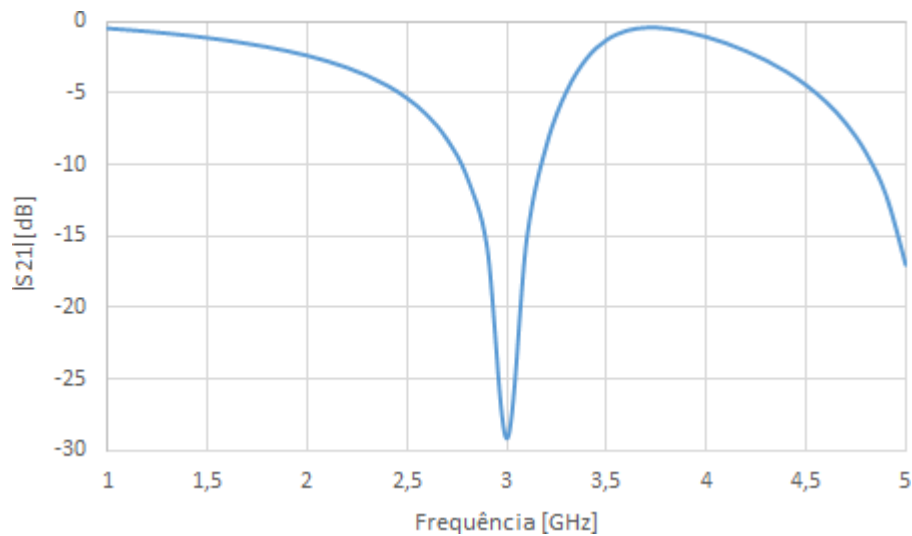
5.3 Antena de Microfita com *Patch* Retangular com DGS Base-ado na Geometria Matrioska Fechada e no SRR ($f_{Antena} = 3$ GHz)

Para atestar a possibilidade de miniaturização da antena de microfita através do uso da estrutura DGS de geometria matrioska fechada, foram projetadas uma antena e uma estrutura baseada na geometria matrioska fechada, ambas ressonantes em 3 GHz. As dimensões estão apresentadas na Tabela 5 e a resposta em frequência desse elemento na Figura 26, quando simulada como uma FSS no *software* ANSYS Designer, considerando a polarização em y.

Tabela 5: Dimensões da antena e da estrutura DGS ($f_r = 3$ GHz).

Dimensões da antena Retangular:
31 x 24 mm
Dimensões do plano de terra:
53 x 53 mm
Dimensões do elemento de geometria matrioska fechada ($f_r = 3$ GHz):
Lx1 = 16,5 mm
Lx2 = 8,5 mm
g = 1 mm
w = 2 mm
dy = 2 mm

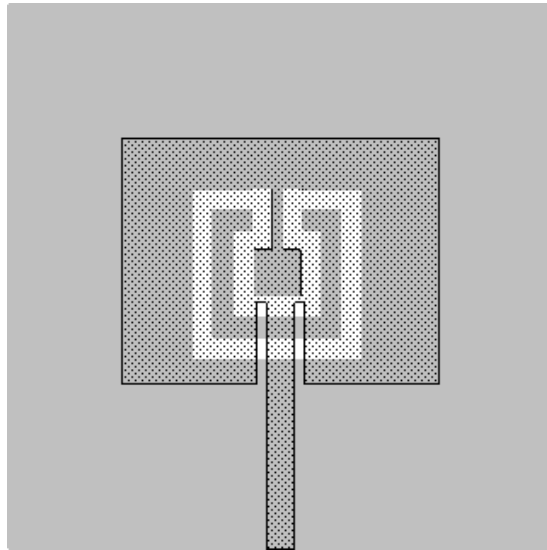
Figura 26: Resposta em Frequência do elemento de geometria matrioska de 3 GHz.



Fonte: Elaborada pela autora.

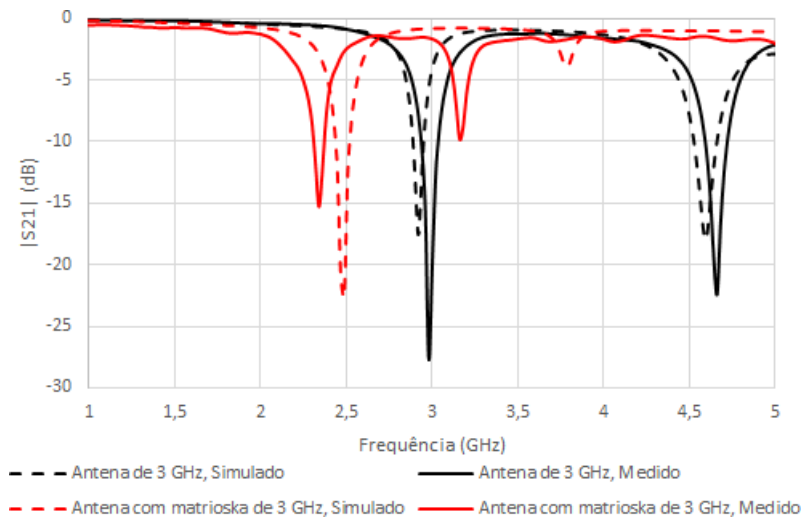
A Figura 27 apresenta o desenho da antena de microfita de 3 GHz com a estrutura DGS de geometria matrioska fechada que ressoa na mesma frequência, e na Figura 28 a resposta em frequência, simulada e medida. Havendo uma redução nas frequências de ressonância do conjunto, antena com DGS, para valores próximos de 2,5 GHz e 3,2 GHz.

Figura 27: Desenho da antena com estrutura DGS baseada na geometria matrioska fechada projetada para 3 GHz.



Fonte: Elaborada pela autora.

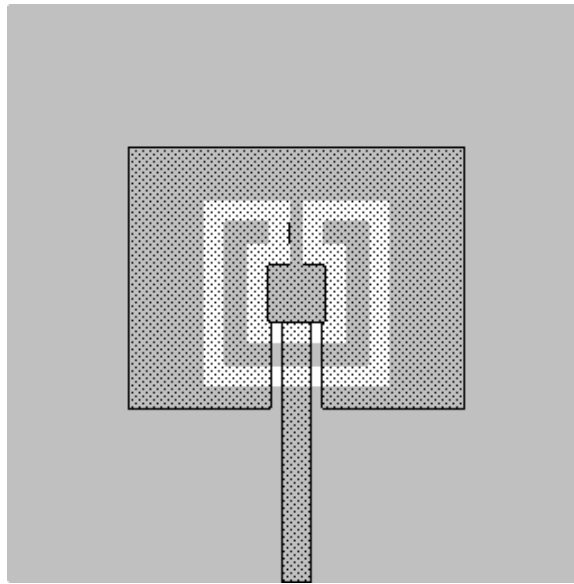
Figura 28: Resposta em frequência da antena com estrutura DGS baseada na geometria matrioska fechada projetada para 3 GHz.



Fonte: Elaborada pela autora.

Também foi verificado qual o comportamento da antena de microfita com estrutura DGS com frequência de ressonância inferior à da antena. Sendo a antena com frequência de ressonância de 3GHz com estrutura DGS, célula unitária, em forma de matrioska fechada centralizada e de frequência de ressonância de 2,5 GHz, apresentada na Figura 29 e com as dimensões da Tabela 6.

Figura 29: Estrutura DGS baseada na geometria matrioska fechada.



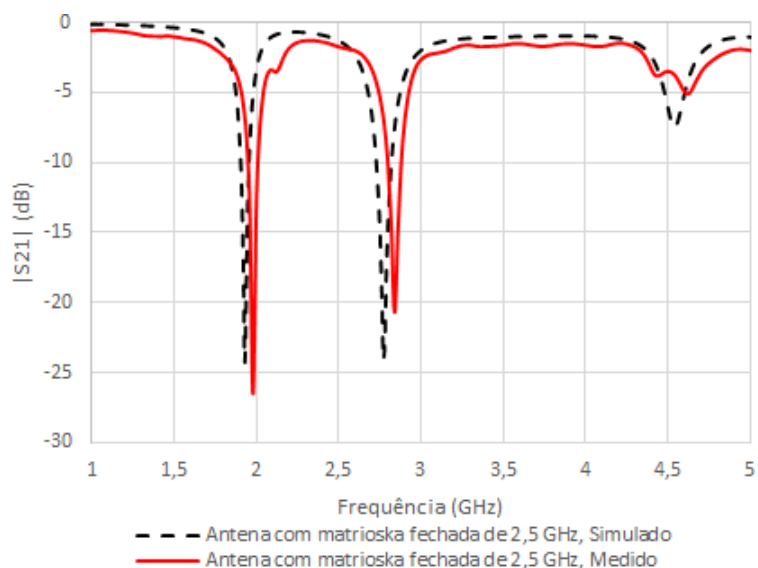
Fonte: Elaborada pela autora.

Tabela 6: Dimensões da antena de 3 GHz e elemento de 2,5 GHz.

Antena retangular:
31 x 24 mm
Plano de Terra:
53 x 53 mm
Elemento de geometria matrioska fechada ($f_r = 2,5\text{GHz}$):
$Lx1 = 17,2\text{mm}$
$Lx2 = 9,2\text{mm}$

De acordo com os resultados simulados e medidos, apresentados na Figura 30, é visto que houve uma redução da primeira e da segunda frequência de ressonância para as frequências de 1,9 GHz e 2,8 GHz, respectivamente. Dessa forma, o elemento de 2,5 GHz ocasionou maior redução na frequência de ressonância da antena de microfita do que o elemento de 3 GHz, sem haver aumento nas dimensões da antena.

Figura 30: Resposta em frequência da antena de 3 GHz com estrutura DGS baseada na geometria matrioska fechada de 2,5 GHz.



Fonte: Elaborada pela autora.

A Tabela 7 mostra os resultados, simulados e medidos, da comparação entre os parâmetros da antena de microfita com patch retangular, projetada para a frequência de ressonância de 3 GHz, quando possui uma estrutura DGS em forma de matrioska fechada projetada para as frequências de ressonância de 2,5 GHz e 3 GHz. Observa-se que com a redução da frequência da estrutura DGS, maior foi a redução da frequência de ressonância da antena, o que conseqüentemente leva a uma maior a capacidade de miniaturização.

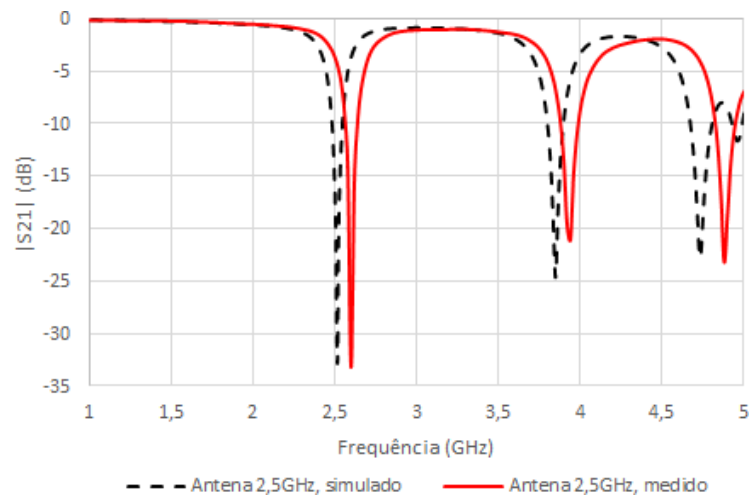
Tabela 7: Parâmetros da antena($f_r = 3\text{GHz}$) com estrutura DGS.

Frequência de ressonância da antena:	
$f_r = 3\text{GHz}$	
Frequência de ressonância da antena com estrutura DGS:	
Geometria matrioska, $f_r = 3\text{GHz}$ (simulado)= 2,45 GHz	
Geometria matrioska, $f_r = 3\text{GHz}$ (medido)= 2,34 GHz	
Geometria matrioska, $f_r = 2,5\text{GHz}$ (simulado)= 1,93 GHz	
Geometria matrioska, $f_r = 2,5\text{GHz}$ (medido)= 1,98 GHz	
Coefficiente de reflexão da antena com estrutura DGS:	
Geometria matrioska, $f_r = 3\text{GHz}$ (simulado)= -21 dB	
Geometria matrioska, $f_r = 3\text{GHz}$ (medido)= -15 dB	
Geometria matrioska, $f_r = 2,5\text{GHz}$ (simulado)= -24 dB	
Geometria matrioska, $f_r = 2,5\text{GHz}$ (medido)= -26 dB	

5.4 Antena Planar com Estruturas DGS de Dimensões Equivalen- tes ($f_{Antena} = 2,5\text{GHz}$)

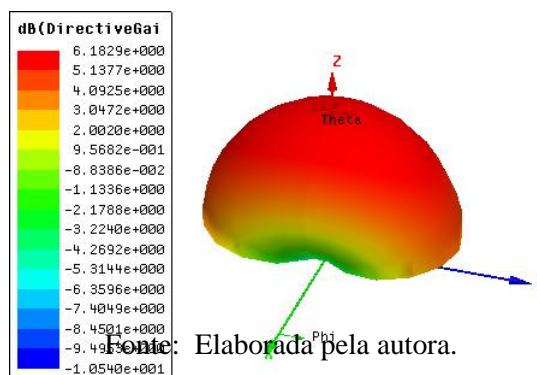
A antena de microfita com *patch* retangular com dimensões apresentadas na Seção 5.1 para a frequência de ressonância de 2,5 GHz, apresenta os resultados da Figura 31, considerando o intervalo de frequência de 1 GHz a 5 GHz. Nessa Figura é possível visualizar os resultados simulado e medido da antena de microfita, os quais apresentaram uma concordância nos valores. O diagrama de radiação em 3D para essa antena retangular com *inset-fed*, $f_r = 2,5\text{GHz}$, está apresentado na Figura 32 e o ganho máximo é de 6,18 dB.

Figura 31: Resposta em frequência da antena de microfita. ($f_{Antena} = 2,5\text{GHz}$)



Fonte: Elaborada pela autora.

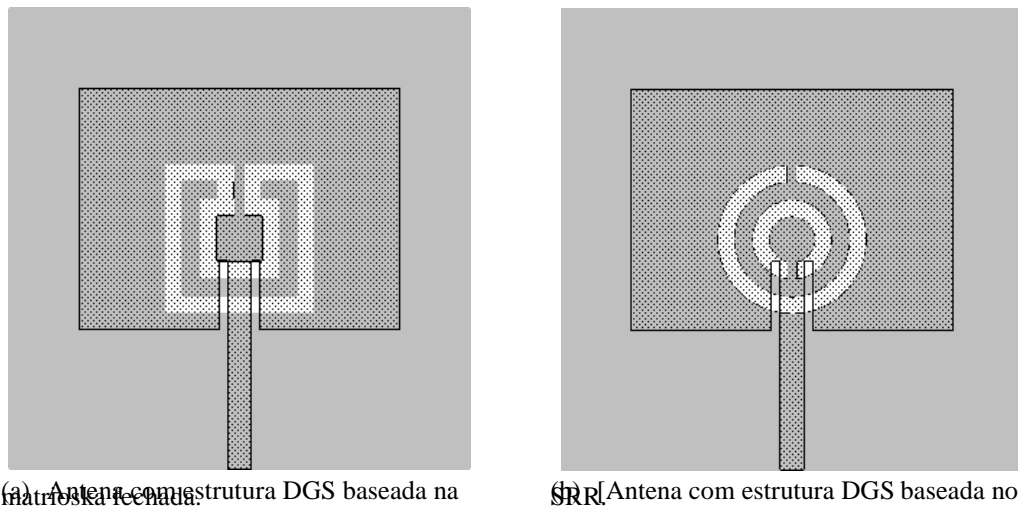
Figura 32: Diagrama de radiação em 3D da antena de microfita. ($f_{Antena} = 2,5\text{GHz}$)



Fonte: Elaborada pela autora.

As estruturas DGS em forma de matrioska fechada e SRR com dimensões equivalentes, ou seja quando o maior diâmetro do SRR é igual ao comprimento da lateral da geometria matrioska, foram adicionadas a antena de microfita com *patch* retangular ($f_r = 2,5$ GHz). A resposta em frequência da antena é alterada de acordo com a variação da estrutura DGS, seja no tamanho do plano de terra, localização e quantidade de elementos, para a geometria matrioska fechada ou circular. Dos diversos modelos analisados, o que apresentou melhor resultado foi a estrutura que apresenta o plano de terra com dimensão: 53 x 53 mm, com um elemento centrado, conforme mostra a Figura 33, e as dimensões estão listadas na Tabela 8.

Figura 33: Desenhos da antena de microfita com estruturas DGS de dimensões equivalentes.



(a) Antena com estrutura DGS baseada na matrioska fechada.

(b) Antena com estrutura DGS baseada no SRR.

Fonte: Elaborada pela autora.

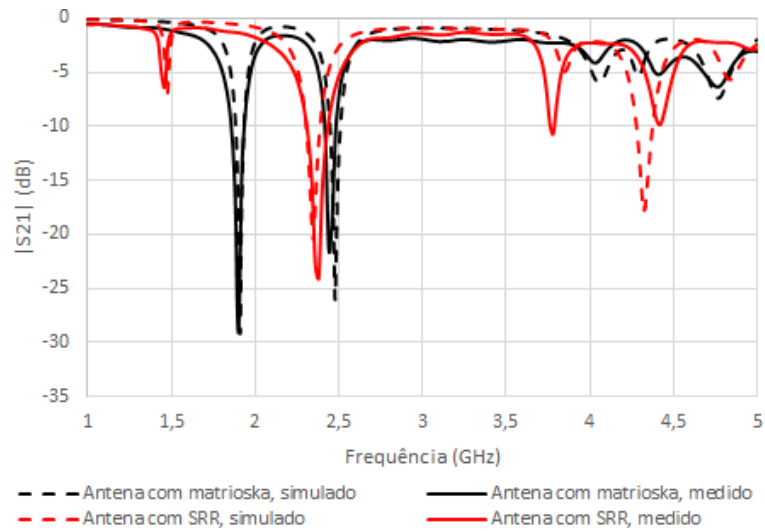
Tabela 8: Dimensões da antena de 2,5 GHz com estrutura DGS.

Antena retangular:
37 x 27,8 mm
Plano de terra:
53 x 53 mm
Elemento da estrutura DGS baseado na matrioska fechada:
$Lx1 = 17,2$ mm
$Lx2 = 9,2$ mm
Elemento da estrutura DGS baseado no SRR:
$r1 = 8,6$ mm
$r2 = 4,6$ mm

Os resultados obtidos para a antena de microfita com estrutura DGS estão apresenta-

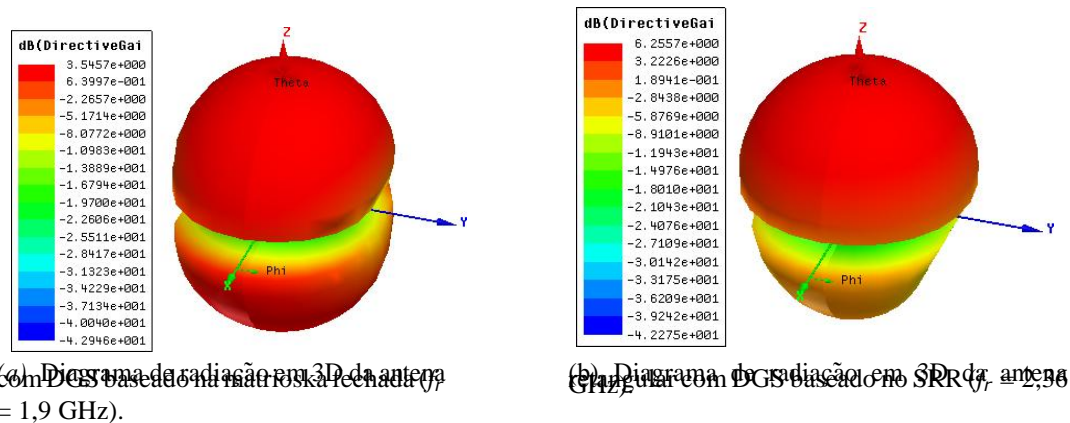
dos na Figura 34, havendo concordância entre os valores simulados e medidos. Os diagramas de radiação em 3D estão ilustrados na Figura 35 e em 2D para ϕ igual a zero e a noventa graus estão nas Figuras 36 e 37, respectivamente. Considerando a frequência de ressonância igual a 1,9 GHz para os diagramas de radiação da antena com DGS baseado em geometria matrioska fechada, e para a estrutura com SRR foi considerado a frequência de 2,36 GHz.

Figura 34: Resposta em frequência das antenas com estruturas DGS de dimensões equivalentes, baseadas na geometria matrioska fechada e no SRR.



Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 35: Diagrama de radiação em 3D da antena de microfita com estrutura DGS de dimensões equivalentes.

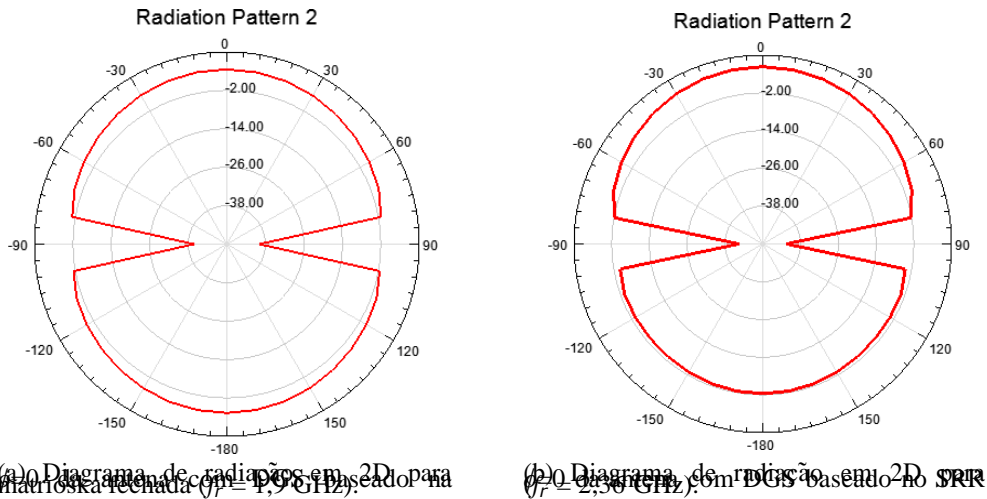


(a) Diagrama de radiação em 3D da antena com DGS baseado na matrioska fechada ($f = 1,9$ GHz).

(b) Diagrama de radiação em 3D da antena com DGS baseado no SRR ($f = 2,36$ GHz).

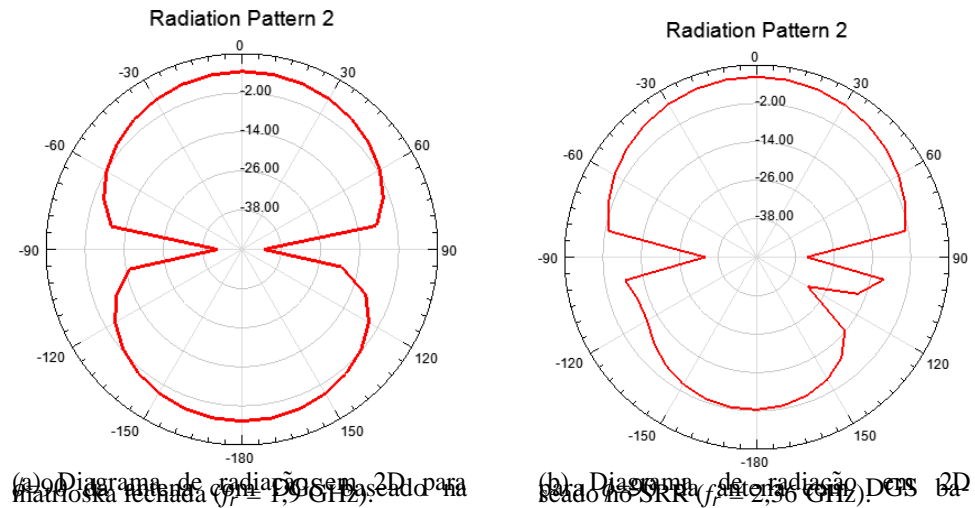
Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 36: Diagrama de radiação em 2D para $\phi=0$ da antena de microfita com estrutura DGS de dimensões equivalentes.



Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 37: Diagrama de radiação em 2D para $\phi=90$ da antena de microfita com estrutura DGS de dimensões equivalentes.



Fonte: Elaborada pela autora.

De acordo com os resultados apresentados nos gráficos anteriores, a frequência de ressonância da antena com estrutura DGS com elemento de geometria matrioska fechada é de 1,9 GHz e com elemento baseado no SRR é de 2,36 GHz. A antena com estrutura DGS em forma de matrioska fechada apresenta uma maior redução na frequência de ressonância do que

a antena com estrutura DGS em forma de SRR, seu diagrama de radiação é aproximadamente omnidirecional e mais uniforme que o diagrama de irradiação da estrutura que utiliza SRR no plano de terra.

Os parâmetros dessas antenas com estrutura DGS de dimensões equivalentes estão listados na Tabela 9. Comparando as geometrias que são baseadas as estruturas DGS, os resultados obtidos com a geometria matrioska fechada tem um melhor casamento de impedância, um menor ganho e um diagrama de radiação mais uniforme quando $\phi=90$ em relação a SRR.

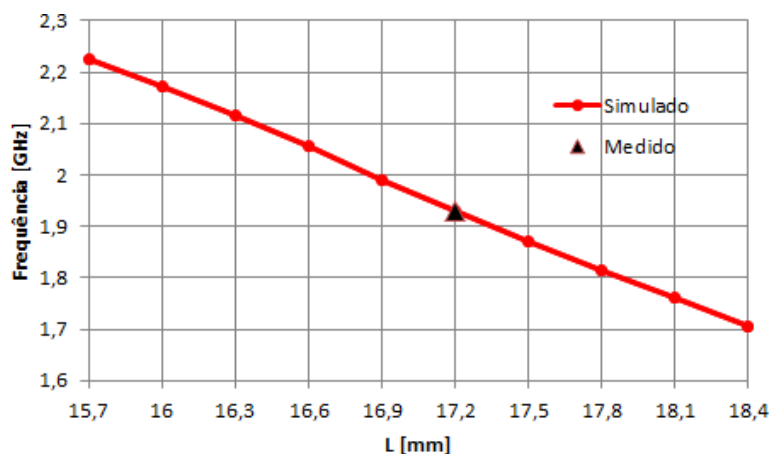
Tabela 9: Parâmetros da antena com estruturas DGS de dimensões equivalentes.

Frequência de ressonância da antena:
f_r (simulado) = 2,5 GHz
f_r (medido) = 2,6 GHz
Frequência de ressonância dos elementos:
Geometria matrioska = 2,5 GHz
SRR = 2,3 GHz
Frequência de ressonância da antena com estrutura DGS:
Geometria matrioska (simulado)= 1,91 GHz
Geometria matrioska (medido)= 1,9 GHz
SRR (simulado)= 2,34 GHz
SRR (simulado)= 2,36 GHz
Coefficiente de reflexão da antena com estrutura DGS:
Geometria matrioska (simulado)= -29,06 dB
Geometria matrioska (medido)= -29 dB
SRR (simulado)= -21 dB
SRR (medido)= -24 dB
Ganho da antena com estrutura DGS:
Geometria matrioska = 3,55 dB
SRR = 6,26 dB

Com o objetivo de analisar o efeito da variação das dimensões do elemento de geometria matrioska fechada na antena de microfita de 2,5 GHz, foi realizada uma variação em torno do comprimento de 17,2 mm, que é o valor do comprimento externo da geometria matrioska com frequência de ressonância em 2,5 GHz. Os resultados estão apresentados na Figura 38, sendo considerada apenas a primeira ressonância da antena de microfita.

Na Figura 38 verifica-se que a medida que ocorre o aumento do comprimento da geometria matrioska fechada, há uma redução na frequência que a antena de microfita ressoa.

Figura 38: Frequência de ressonância \times Comprimento do elemento de geometria matrioska fechada.

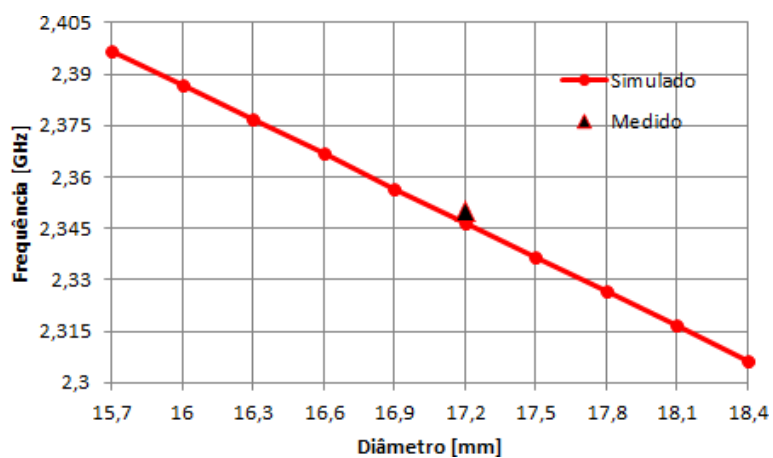


Fonte: Elaborada pela autora.

O mesmo procedimento foi realizado para o caso da antena de microfita, de 2,5 GHz, com estrutura DGS baseada no SRR, a variação ocorreu em torno do diâmetro de 17,2 mm, que é o valor do diâmetro externo do elemento com frequência de ressonância de 2,3 GHz.

Os resultados obtidos estão na Figura 39, os quais apresentaram uma variação menor da frequência em relação ao aumento do diâmetro do elemento baseado no SRR, em comparação com os resultados obtidos com o elemento de geometria matrioska fechada.

Figura 39: Frequência de ressonância \times Diâmetro do elemento baseado no SRR.

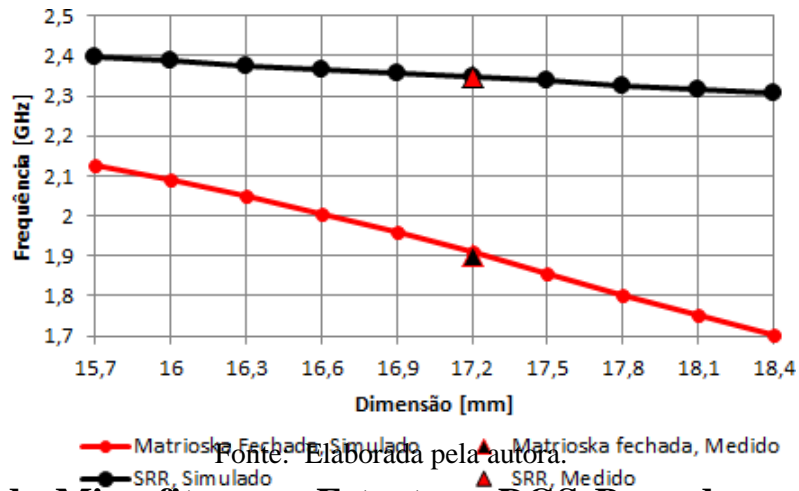


Fonte: Elaborada pela autora.

A Figura 40 apresenta o comportamento da frequência em relação a dimensão do ele-

mento da estrutura DGS, comprimento ou diâmetro, das antenas de microfita com estruturas DGS baseadas na geometria matrioska e SRR. Apesar de ambas apresentarem uma relação de quanto maior o valor da dimensão dos elementos menor é a frequência de ressonância da antena, a estrutura DGS baseada em geometria matrioska fechada apresenta um efeito maior na redução da frequência de ressonância.

Figura 40: Frequência de ressonância × Dimensão dos elementos.



5.5 Antena de Microfita com Estrutura DGS Baseada na Geometria Matrioska Aberta e no SRR ($f_{Antena} = 3,5\text{GHz}$; $f_{Elemento} = 2,6\text{GHz}$; $f_{Conjunto} = 2,5\text{GHz}$)

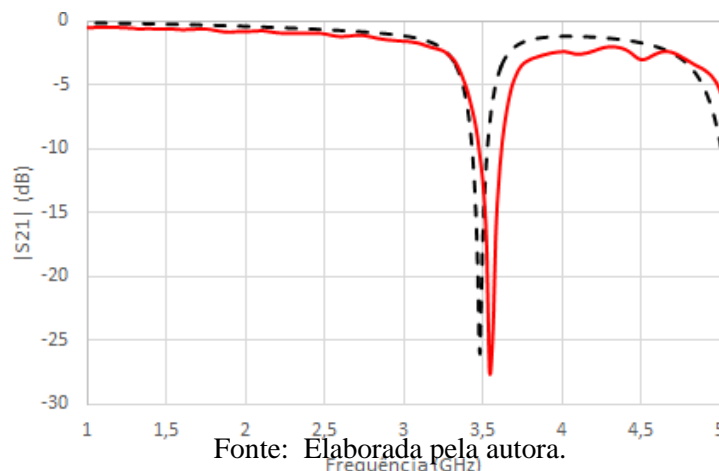
Confirmando a possibilidade de miniaturização através do uso de estrutura DGS baseada na matrioska fechada, foi projetada uma antena de microfita com estrutura DGS com diferentes arranjos, de modo que o conjunto final (antena mais DGS) estejam sintonizados na frequência de ressonância de 2,5 GHz.

Neste caso, a estrutura DGS com geometria matrioska utilizada tem abertura no anel mais interno representando uma matrioska aberta, que foi projetada considerando a polarização do campo elétrico em y, tendo seu comprimento efetivo como aproximadamente igual ao comprimento de onda como mostra o Capítulo 3.2. Esse modelo torna possível obter uma redução da frequência de ressonância utilizando um elemento de comprimento reduzido,

ou seja, a antena ressoará em uma frequência mais baixa através de um elemento que ocupa uma área menor.

Nesta dissertação a antena de microfita retangular utilizada tem uma frequência de ressonância de 3,5 GHz, como mostra a Figura 41, e dimensões de 28 mm x 20 mm. Contendo no seu plano de terra uma estrutura DGS, com geometrias matrioska aberta e SRR, projetada para uma frequência de ressonância de 2,6 GHz, já que foi verificado nas simulações anteriores para a geometria matrioska fechada que quanto menor a ressonância do elemento em relação a frequência de ressonância da antena de microfita, maior é a redução da frequência resultante da antena com estrutura DGS.

Figura 41: Resposta em frequência da antena em microfita *patch* retangular. ($f_{Antena} = 3,5$ GHz)



Fonte: Elaborada pela autora.

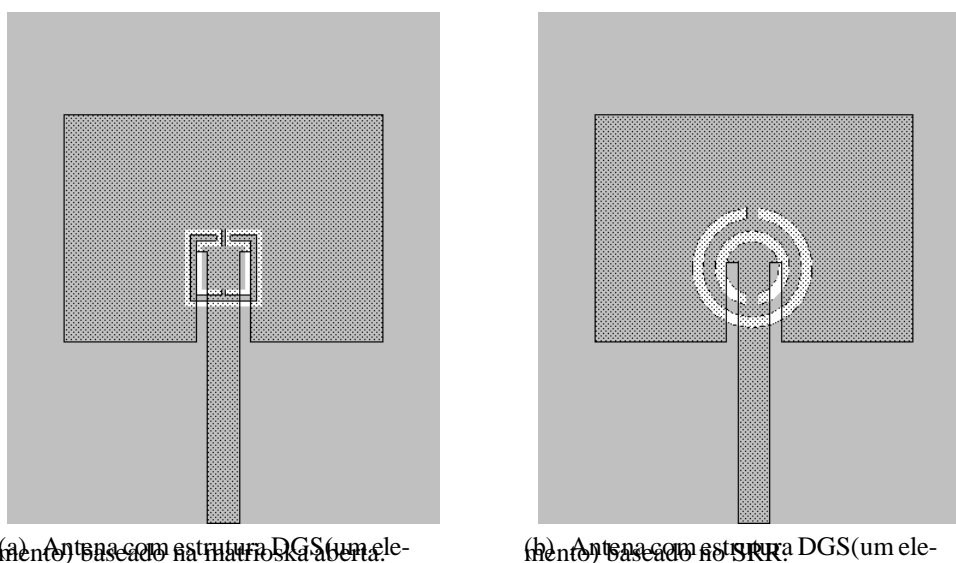
5.5.1 Antena com Estrutura DGS (Um Elemento), $f_{Conjunto} = 2,5$ GHz

A investigação utilizando a geometria matrioska aberta foi realizada para o conjunto da antena com a estrutura DGS ressoando em 2,5 GHz, tendo os elementos as dimensões detalhadas na Tabela 10. Para isso, a antena convencional ressoa na frequência de 3,5 GHz, enquanto que tanto o elemento da estrutura DGS em forma de geometria matrioska aberta (Figura 42.a) quanto o baseado no SRR (Figura 42.b) foram projetados para ressoar na frequência de 2,6 GHz.

Tabela 10: Dimensões da antena com estrutura DGS (um elemento).

Antena Retangular	
28 x 20 mm	
Plano de Terra	
38 x 45 mm	
Elemento da estrutura DGS baseado na Matrioska Aberta	
$Lx1 = 6,8$ mm	
$Lx2 = 4,8$ mm	
Elemento da estrutura DGS baseado no SRR	
$r1 = 5,4$ mm	
$r2 = 3,5$ mm	

Figura 42: Desenho da antena com estrutura DGS (um elemento).

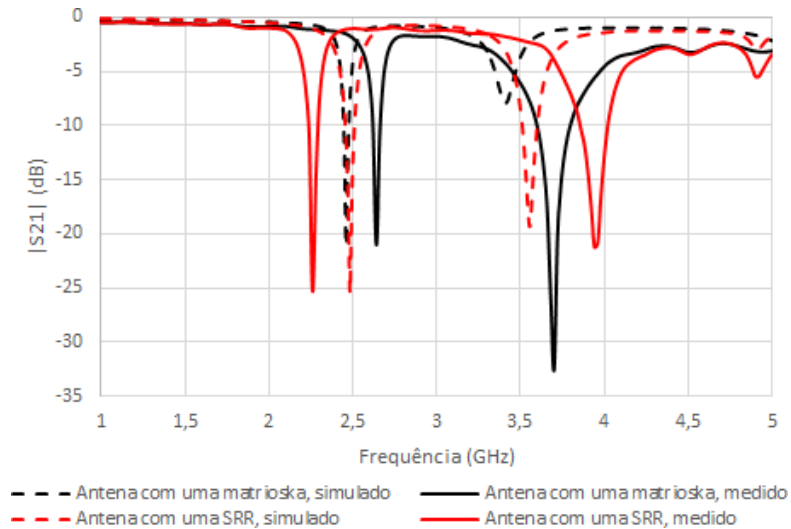


Fonte: Elaborada pela autora.

Os resultados simulados e medidos para o conjunto antena de microfita com a estrutura DGS com um elemento são mostrados na Figura 43. Analisando os resultados da antena de microfita com estrutura DGS para as duas geometrias apresentadas, observa-se que houve uma redução na frequência de ressonância da antena com estrutura DGS para as duas geometrias, e apesar da matrioska aberta ocupar uma área menor no plano de terra, o SRR foi a geometria que possibilitou maior redução da frequência. Os valores medidos e simulados estão diferentes para as duas geometrias devido as trilhas serem de 0,5 mm e a abertura de 0,25mm, acontecendo de no processo de corrosão das placas ter havido alguma diferença

que redundou no resultado medido e também os equipamentos utilizados na confecção das antenas são imprecisos em desenhos de trilhas com largura inferior a 1 mm.

Figura 43: Resposta em frequência da antena com estrutura DGS.

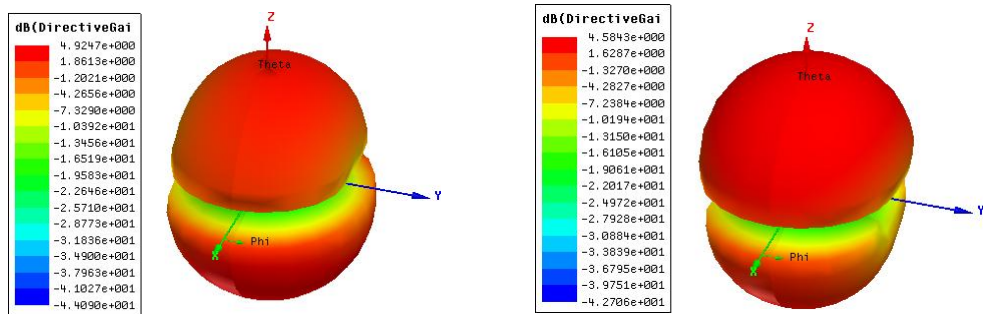


Fonte: Elaborada pela autora.

Os diagramas de radiação em 3D e 2D apresentam comportamentos diferentes para as situações de radiação das antenas, tendo com a estrutura de geometria matrioska aberta uma maior intensidade no lóbulo traseiro e um digrama mais uniforme, como mostram as Figuras 44, 45 e 46, respectivamente.

A antena com estruturas DGS em forma de matrioska aberta apresenta um ganho de 4,92 dB, enquanto que a antena com estruturas em forma de SRR tem um ganho de 4,58 dB. O elemento de geometria matrioska aberta além de apresentar maior ganho em relação ao SRR, ocupa uma área de $46,24 \text{ mm}^2$ no plano de terra da antena de microfita enquanto que o elemento SRR ocupa uma área de $91,61 \text{ mm}^2$, ou seja, a geometria matrioska aberta ocupa menor área no plano de terra, como pode ser visualizado na Figura 42. A maior intensidade de radiação da antena com estrutura DGS baseada na geometria matrioska aberta é concentrada na parte traseira da antena o que permite que a antena tenha duas direções preferenciais.

Figura 44: Diagrama de radiação em 3D da antena com estrutura DGS(um elemento).

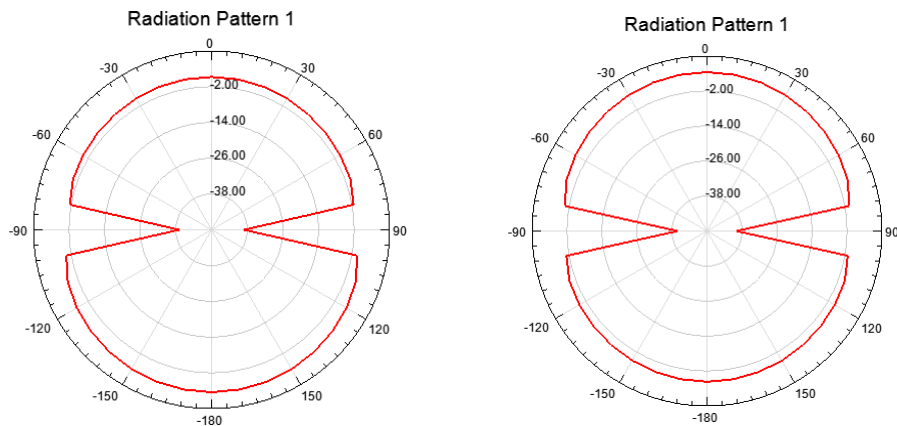


(a) Diagrama de radiação em 3D da antena com estrutura DGS(um elemento) baseado na microfita aberta. (Ganho = 4,92dB)

(b) Diagrama de radiação em 3D da antena com estrutura DGS(um elemento) baseado no SRR. (Ganho = 4,58dB)

Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 45: Diagrama de radiação em 2D para $\phi=0$ da antena de microfita com estrutura DGS(um elemento).

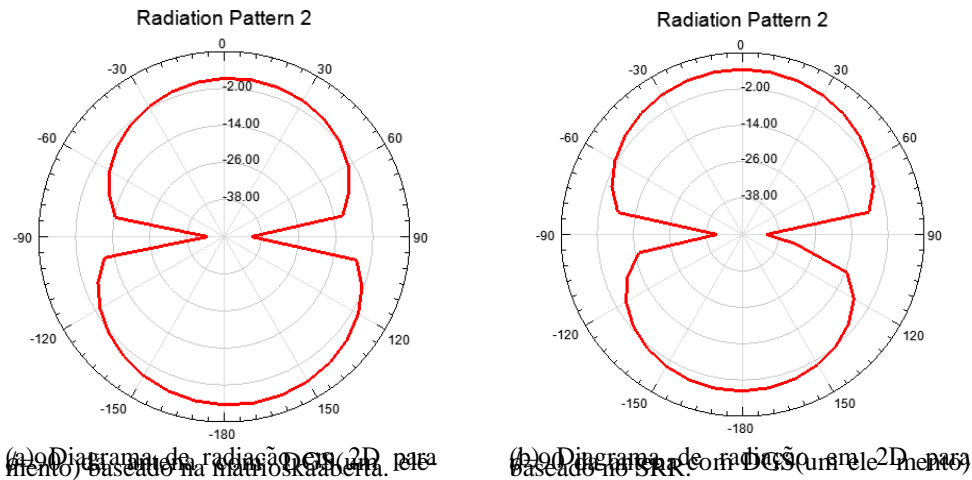


(a) Diagrama de radiação 2D da antena com estrutura DGS(um elemento) baseado na microfita aberta.

(b) Diagrama de radiação 2D da antena com estrutura DGS(um elemento) baseado no SRR.

Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 46: Diagrama de radiação em 2D para $\phi=90$ da antena de microfita com estrutura DGS(um elemento).



Fonte: Elaborada pela autora.

A Tabela 11, apresenta os resultados obtidos com esse modelo de antena com estrutura DGS com um elemento.

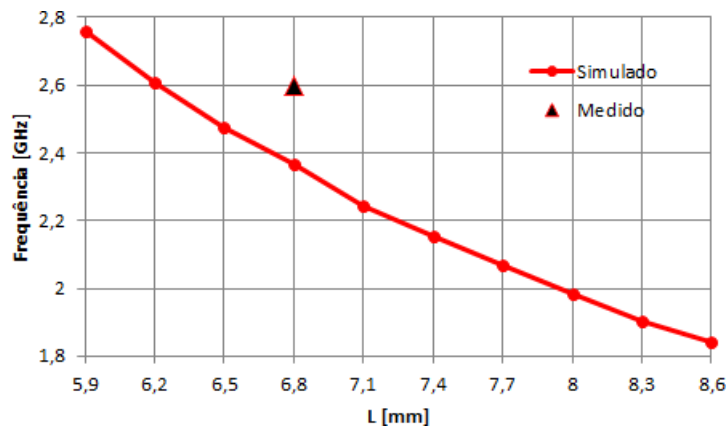
Tabela 11: Parâmetros da antena com estrutura DGS(um elemento).

Frequência de Ressonância da Antena:
f = 3,5 GHz
Frequência de Ressonância dos elementos:
Matrioska Aberta = 2,6 GHz
SRR = 2,6 GHz
Frequência de Ressonância da Antena com estrutura DGS:
Matrioska Aberta (simulado) = 2,5 GHz
Matrioska Aberta (medido) = 2,64 GHz
SRR (simulado) = 2,5 GHz
SRR (medido) = 2,26 GHz
Coefficiente de Reflexão da Antena com estrutura DGS:
Matrioska Aberta (simulado) = -21 dB
Matrioska Aberta (medido) = -22 dB
SRR (simulado) = -25 dB
SRR (medido) = -25 dB
Ganho da Antena com estrutura DGS:
Matrioska Aberta = 4,92dB
SRR = 4,58dB

Variando as dimensões do elemento de geometria matrioska aberta na antena de mi-

crofita de 3,5 GHz, sendo essa variação em torno do comprimento de 6,8 mm, que é o valor do comprimento externo dessa geometria com frequência de ressonância em 2,6 GHz. Os resultados da primeira ressonância estão apresentados na Figura 47.

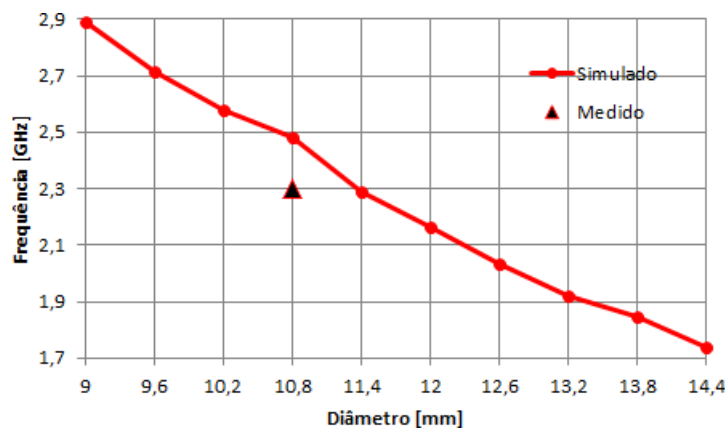
Figura 47: Frequência de ressonância \times Comprimento da matrioska aberta.



Fonte: Elaborada pela autora.

O mesmo procedimento foi realizado para o caso da antena de microfita, de 3,5 GHz, com estrutura DGS baseada no SRR, a variação ocorreu em torno do raio de 10,8 mm, que é o valor do diâmetro externo do elemento baseado no SRR com frequência de ressonância de 2,6 GHz. Os resultados obtidos estão na Figura 48, os quais apresentaram uma variação menor da frequência em relação ao aumento do diâmetro do elemento baseado no SRR, em comparação com os resultados obtidos com o elemento de geometria matrioska aberta.

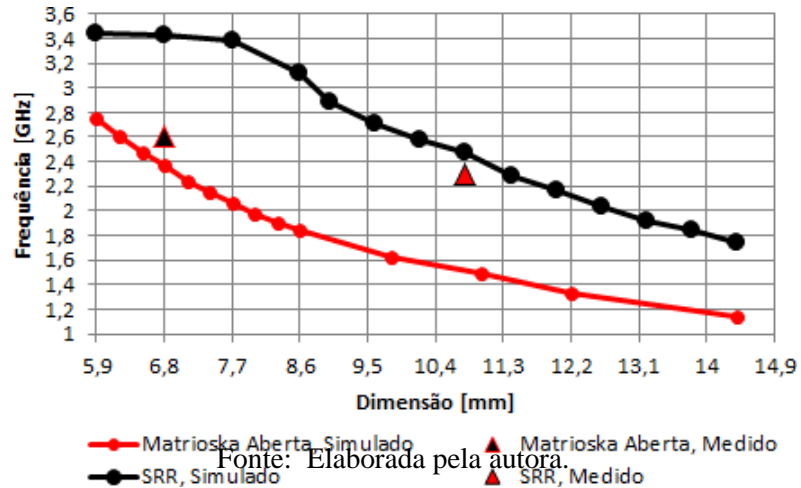
Figura 48: Frequência de ressonância \times Diâmetro do SRR.



Fonte: Elaborada pela autora.

Para os dois elementos, geometria matrioska aberta e SRR, as frequências das antenas de microfita em relação das dimensões dos elementos apresentam comportamentos semelhantes, a frequência de ressonância reduz a medida que aumenta a dimensão dos elementos, como mostra a Figura 49.

Figura 49: Frequência de ressonância × Dimensão do elemento.



5.5.2 Antena com Estrutura DGS (Quatro Elementos), $f_{Conjunto} = 2,5\text{GHz}$

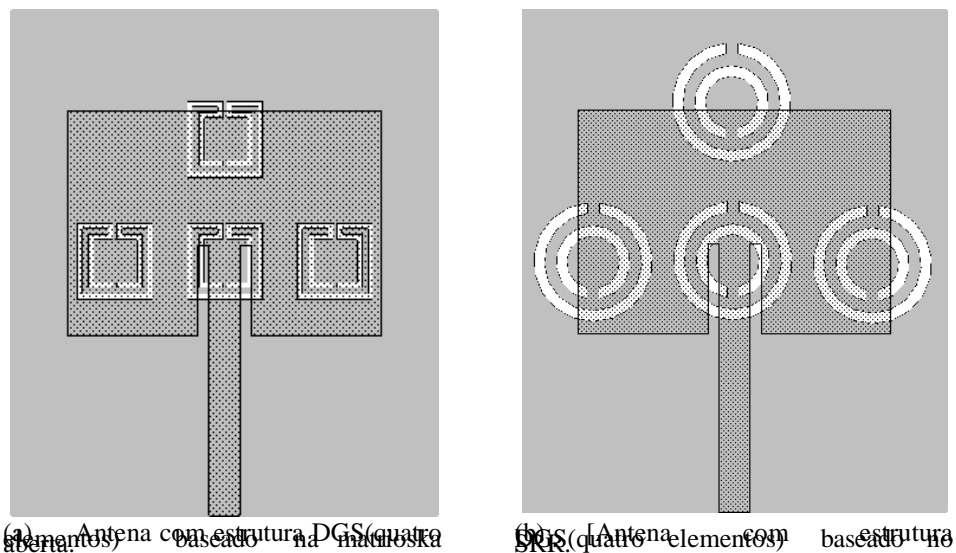
Após os testes da estrutura DGS com célula unitária foi realizada a variação no número e na localização dos elementos no plano de terra, para analisar os efeitos ocasionados. Sendo que o aumento do número de elementos na estrutura DGS limita a redução do tamanho da antena, pois a área ocupada do plano de terra aumenta. Diante das possibilidades testadas o arranjo com quatro elementos apresentou o melhor resultado, considerando a redução na frequência de ressonância próxima de 2,5 GHz e um bom casamento de impedância da antena.

Para essa nova configuração, com quatro elementos, a antena com estrutura DGS em forma de matrioska aberta e de SRR tem as dimensões da Tabela 12 e a distribuição dos elementos que apresentou melhor resultado está apresentada na Figura 50.

Tabela 12: Dimensões da antena com estrutura DGS(quatro elementos).

Antena Retangular
28 x 20 mm
Plano de Terra
38 x 45 mm
Elemento da estrutura DGS baseado na Matrioska Aberta
$Lx1 = 6,8$ mm
$Lx2 = 4,8$ mm
Elemento da estrutura DGS baseado no SRR
$r1 = 5,4$ mm
$r2 = 3,5$ mm

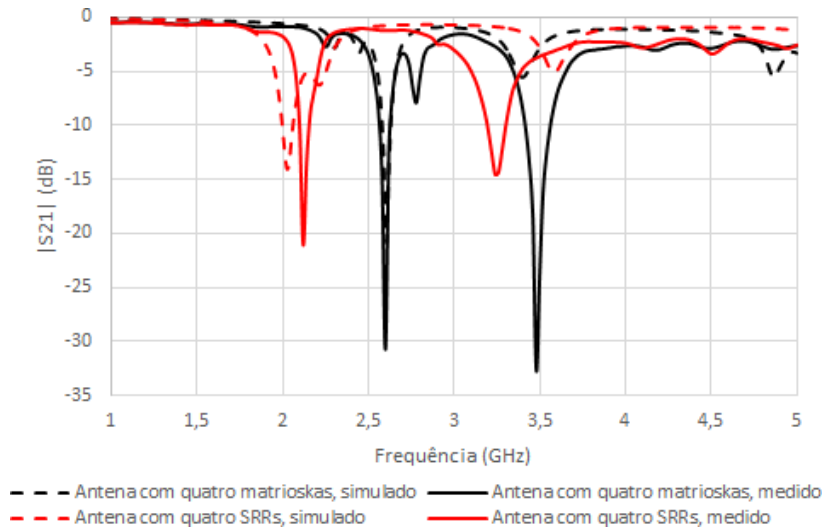
Figura 50: Desenho da antena com estrutura DGS(quatro elementos).



Fonte: Elaborada pela autora.

De acordo com os resultados obtidos ilustrados na Figura 51, com a antena de microfita com estrutura DGS com quatro elementos de geometria matrioska aberta tem-se uma redução para a frequência de 2,24 GHz, e um bom casamento de impedância. Com a utilização de estrutura DGS com quatro elementos baseados no SRR, a frequência reduziu para 2,12 GHz que é o menor valor obtido entre as geometrias, porém não apresentou um bom casamento de impedância e esses elementos ocupam uma maior área no plano de terra.

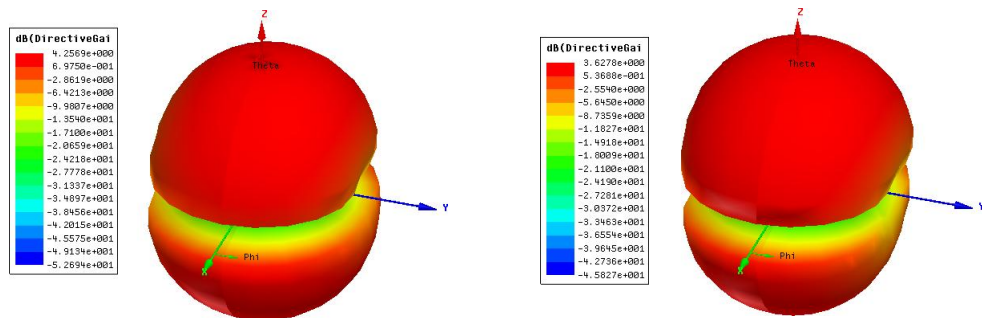
Figura 51: Resposta em frequência da antena com estrutura DGS(quatro elementos).



Fonte: Elaborada pela autora.

Analisando as Figuras 52, 53 e 54, que são os diagramas de radiação dessas antenas em 3D e 2D, entende-se que ocorre a mesma situação da radiação da antena com o lóbulo traseiro maior para a antena com estrutura DGS em forma de matrioska aberta no plano de terra. A antena de microfita com estrutura DGS baseado na matrioska aberta apresenta um ganho de 4,26 dB, enquanto que com a estrutura baseada no SRR o ganho foi de 3,63 dB.

Figura 52: Diagrama de radiação em 3D da antena com estrutura DGS(quatro elementos).

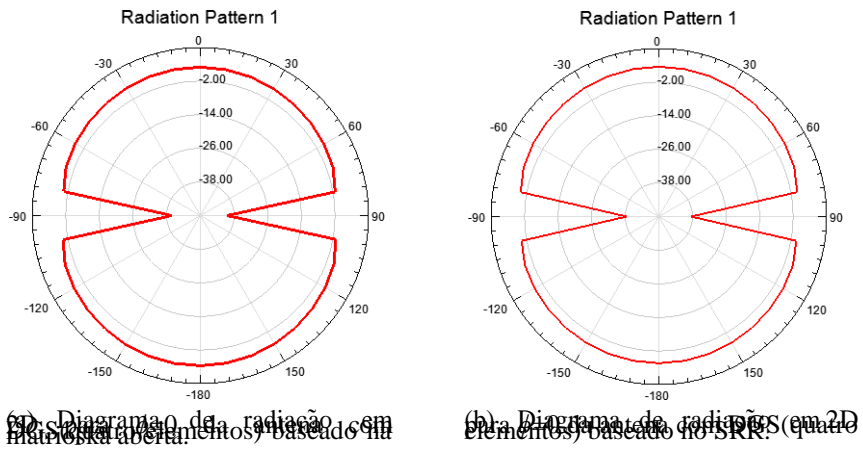


(a) Diagrama de radiação em 3D da antena baseada na matrioska aberta (Quatro elementos) Base ant

(b) Diagrama de radiação em 3D da antena baseada no SRR (Quatro elementos) Base ant

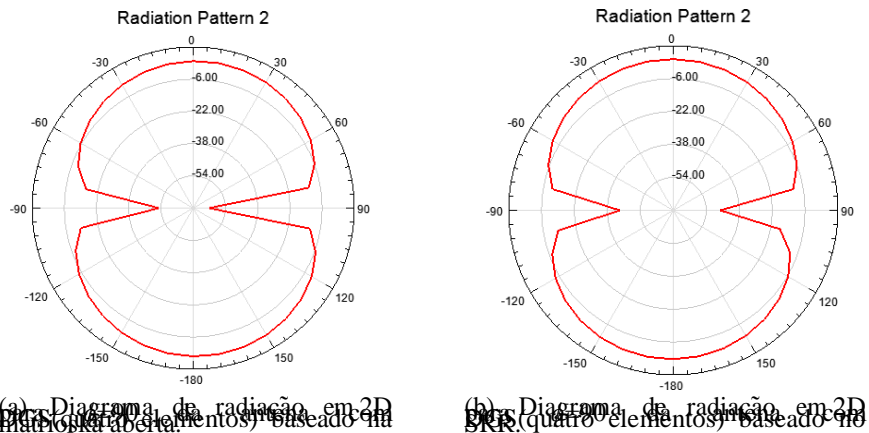
Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 53: Diagrama de radiação em 2D para $\phi=0$ da antena de microfita com estrutura DGS(quatro elementos).



Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 54: Diagrama de radiação em 2D para $\phi=90$ da antena de microfita com estrutura DGS(quatro elementos).



Fonte: Elaborada pela autora.

Os parâmetros da antena com estruturas DGS estão listados na Tabela 13. Os elementos de geometria matrioska aberta ocupam menor área no plano de terra e apresentam melhores resultados de frequência de ressonância, casamento de impedância e ganho para o projeto.

Tabela 13: Parâmetros da antena com estrutura DGS(quatro elementos).

Frequência de Ressonância da Antena:
f = 3,5GHz
Frequência de Ressonância do elemento:
Matrioska Aberta = 2,6 GHz
SRR = 2,6 GHz
Frequência de Ressonância da Antena com DGS:
Matrioska Aberta (simulado)= 2,24 GHz
Matrioska Aberta (medido)= 2,6 GHz
SRR (simulado)= 2,02 GHz
SRR (medido)= 2,12 GHz
Coefficiente de Reflexão da Antena com DGS:
Matrioska Aberta (simulado)= -21 dB
Matrioska Aberta (medido)= -31 dB
SRR (simulado)= - 17 dB
SRR (medido)= -21 dB
Ganho da Antena com DGS:
Matrioska Aberta = 4,26 dB
SRR = 3,63 dB

Relacionando o resultado obtido da estrutura DGS com quatro elementos de geometria matrioska aberta com a estrutura DGS com apenas um elemento, tem-se que o melhor caso foi para a antena de microfita utilizando na estrutura DGS apenas um elemento, pois além de apresentar a frequência de ressonância próxima ao valor desejado e maior ganho, ainda ocupa menor área no plano de terra da antena, o que possibilita uma maior redução da antena, pois apresenta uma menor limitação do plano de terra.

6 Considerações Finais

Neste trabalho foram desenvolvidas e caracterizadas antenas com estrutura DGS baseada na geometria matrioska, que na maioria dos modelos de estrutura DGS apresentaram melhor resultado em relação as antenas com estruturas DGS baseadas no SRR.

Inicialmente foi verificado a eficiência da antena de microfita com estrutura DGS em forma de matrioska, considerando a sua miniaturização com conservação de desempenho, tomando como base os resultados obtidos nas mesmas condições de antenas com estrutura DGS baseada no SRR, o qual já possui vários estudos que atestam sua funcionalidade. Atendendo a influência da frequência de ressonância da estrutura DGS na frequência da antena, foi verificado que a medida que diminui a frequência de ressonância da estrutura DGS, a frequência na qual a antena ressoa também tem uma redução.

Duas antenas com estrutura DGS foram projetadas ressoando em aproximadamente 2,5 GHz, fabricadas e caracterizadas numericamente e experimentalmente. Os resultados numéricos foram obtidos com o uso do software ANSYS Designer. A caracterização experimental foi realizada no Laboratório de Medidas em Telecomunicações do IFPB. Uma boa concordância entre os resultados numéricos e medidos foi observada.

Nas estruturas DGS foram modificadas as quantidades e posições dos elementos, sendo que nas duas configurações para a estrutura DGS na forma de matrioska aberta, a que apresentou melhor resultado, considerando a frequência de ressonância aproximadamente igual a 2,5 GHz, maior ganho e melhor casamento de impedância, foi a estrutura DGS com quatro elementos. Em comparação com a antena convencional que ressoa em 2,5 GHz, essa configuração da antena com estrutura DGS apresentou uma redução da área do *patch* de 45,6%.

Em comparação com as antenas que utilizam estrutura DGS baseada no SRR, geralmente nos testes a antena com estrutura de geometria matrioska aberta apresentou melhor casamento de impedância, maior ganho e menor área ocupada no plano terra. Sendo que ambas as geometrias, matrioska aberta e SRR, na estrutura DGS apresentaram diminuição das frequências de ressonâncias da antena de microfita.

6.1 Trabalhos Futuros

Como proposta para continuidade deste trabalho, novas pesquisas podem ser desenvolvidas, como exemplo:

- Realizar ajustes para obter melhorias na antena de microfita com estrutura DGS de célula unitária, pois com apenas um elemento tem a possibilidade reduzir o tamanho do plano de terra;
- Aplicar a estrutura DGS baseada na geometria matrioska em antenas de microfita com diferentes geometrias do *patch*;
- Avaliar a inserção de estruturas DGS em arranjos de antenas de microfita;
- Aplicar a geometria matrioska como estrutura DGS em antenas de microfita e como elemento sobreposto ao *patch* radiante.

6.2 Trabalhos Publicados

SANTOS, M. G. A. R.; SILVA, J. C. E. ; SOUTO, A. H. P. ; GOMES NETO, A. . Investigação do Uso de Estruturas CSRR em Antenas de Microfita. In: Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais, 2018, Campina Grande. Anais do XXXVI Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais, 2018.

PEREIRA SOUTO, ÁLEF HUAN ; COSTA E SILVA, JEFFERSON ; ALVES RODRIGUES SANTOS, MARÍLIA GABRIELLA ; GOMES NETO, ALFREDO . Caracterização numérica e experimental de estruturas CSRR em antenas de microfita. PRINCIPIA (JOÃO PESSOA), v. 1, p. 188-199, 2019.

Referências

- AHN D.; PARK, J. . K. C. . K. J. Q. Y. I. T. A design of the low-pass filter using the novel microstrip defected ground structure. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, v. 49, n. 1, p. 86–93, 2001.
- AJAY V.; PARVATHY, A. T. M. Microstrip antenna with dgs based on csrr array for wimax applications. *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, v. 9, n. 1, p. 157–162, 2019.
- ANATEL. *Plano de Atribuição, Destinação e Distribuição de Frequências no Brasil*. 2020. in Portuguese, Brasília, Brasil.
- ARYA A. K.; KARTIKEYAN, M. V. P. A. Defected ground structure in the perspective of microstrip antennas: A review. *Frequenz*, v. 64, p. 79–84, 2010.
- BAHL J.; BHARTIA, P. *Microstrip Antennas*. [S.l.]: Dedham MA: Artech House, 1980.
- BALANIS, C. A. *Antenna Theory: Analysis and Design*. [S.l.]: John Wiley, 1997.
- BARROS, V. F. *Estudo do Efeito de Substratos Metamateriais em Parâmetros de Antenas de Microfita*. 2012. *Dissertação (Mestrado)*, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN.
- CALOZ C.; ITOH, T. *Electromagnetic Metamaterials: Transmission Line Theory and Microwave Applications*. [S.l.]: Wiley and IEEE Press, 2005.
- CASTRO, P. J. Estudo experimental e comparativo das propriedades eletromagnéticas de metamateriais de anéis repartidos não-uniformes e uniformes. *Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais*, Novembro 2014.
- CHANG I.; LEE, B. Design of defected ground structures for harmonic control of active microstrip antennas. *IEEE AP-S International Symposium*, v. 2, p. 852–855, 2002.
- COSTA, K. Q. *Análise Teórica de Novos Tipos de Antenas de Banda Larga e de Dimensões Reduzidas*. 2006. *Tese de Doutorado(Engenharia Elétrica)* - Universidade Federal do Pará, Belém, PA.
- CRUZ, J. N. *Caracterização de FSS com Geometria Matrioska Aberta*. 2015. *Dissertação (Mestrado)* - Instituto Federal da Paraíba, João Pessoa, PB.
- CRUZ, J. N. Caracterização de FSS com Geometria Matrioska Aberta. *Dissertação* - Instituto Federal da Paraíba, João Pessoa, PB, 2015.
- DAI H.-N.; WANG, H. X. G. W. J. I. M. Big data analytics for manufacturing internet of things: opportunities, challenges and enabling technologies. *Enterprise Information Systems*, p. 1–25, 2019.
- DESCHAMPS, G. A. Microstrip microwave antenas. *USAF Symposium on Antennas*, 1953.

- FERREIRA, H. P. A. *Matrioska: Uma Proposta de Geometria Para FSS Multibandas*. 2014. *Dissertação (Mestrado) - Instituto Federal da Paraíba, João Pessoa, PB*.
- FILHO, V. A. A. *Arranjos Log-Periódicos Compactos em Microfita com Elementos Fractais de Koch*. 2010. *Universidade Federal do Rio Grande do Norte*.
- GOTTARDI G.; OLIVERI, G. M. A. New antenna design concept for future generation wireless communication systems. *12th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, 2018.
- HURBER, M. *Boneca Matrioska*. 2011. Disponível em: (<http://mauriciohuber.blogspot.com.br/2011/08/Matrioska.html>). Acesso em: 13 fev. 2019.
- HUSSAIN R.; ALRESHAID, A. T. P. S. K. S. M. S. A compact 4g mimo antenna integrated with a 5g array for current and future mobile handsets. *IET Microwaves, Antennas Propagation*, v. 11, 2017.
- KIM C.-S.; PARK, J.-S. A. D. L. J.-B. A novel 1-d periodic defected ground structure for planar circuits. *IEEE Microwave and Guided Wave Letters*, v. 10, n. 4, p. 131–133, 2000.
- KRAUS, J. D. C. K. R. *Electromagnetics*. [S.l.]: McGraw-Hill edition, 1973.
- LI W. T.; SHI, X. W. H. Y. Q. Novel planar uwb monopole antenna with triple band-notched characteristics. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, Vol 8, p. 1094–1098, 2009.
- LIM J.-S.; KIM, C.-S. P. J.-S. A.-D. N. S. Design of 10 db 90 branch line coupler using microstrip line with defected ground structure. *Electronics Letters*, v. 36, n. 21, p. 1784–1785, 2000.
- LUNA D. R.; NETO, V. P. S. V.-C. F. L. A. A. G. Microstrip patch antennas with metamaterial inspired substrates and superstrates. *IEEE*, 2013.
- MARQUES R.; MESA, F. M. J. M. F. Comparative analysis of edge and broadside-coupled split ring resonators for metamaterial design-theory and experiments. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, v. 51, n. 10, p. 2572–2581, 2003.
- MOURA, C. G. *Uso de Metamaterial em Antenas de Microfita com Supercondutor*. 2015. *Tese de Doutorado - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN*.
- NETO, M. P. S. *Um Estudo de Metamaterial em Antenas de Microfita*. 2014. *Tese de Doutorado - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN*.
- PARK I.; KHANDELWAL, M. K. K. B. K. K. S. Defected ground structure: Fundamentals, analysis, and applications in modern wireless trends. *International Journal of Antennas and Propagation*, 2018527, v. 2017, 2017.
- PARK J. I.; KIM, C.-S. K. J. P. J.-S. Q. Y. A. D. I. T. Modeling of a photonic bandgap and its application for the low-pass filter design. *Microwave Conference*, v. 2, p. 331–334, 1999.

- PARK J.; KIM, J.-H. L. J.-H. K. S.-H. M. S.-H. A novel equivalent circuit and modeling method for defected ground structure and its application to optimization of a dgs lowpass filter. *Microwave Symposium Digest*, v. 1, p. 417–420, 2002.
- PATEL U.; UPADHYAYA, T. K. Design and analysis of compact -negative material loaded wideband electrically compact antenna for wlan/wimax applications. *Progress In Electromagnetics Research*, Vol 79, 2019.
- PENDRY, J. B. “Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena. 2075- 2084: *IEEE Trans. Microw. Theory Tech*, 1999. v. 47.
- POZAR D. M.; SCHAUBERT, D. H. Microstrip antennas: The analysis and design of microstrip antennas and arrays. *IEEE PRESS*, 1995.
- SACHS J.; WALLSTEDT, K. A. F. E.-G. *Boosting Smart Manufacturing With 5G Wireless Connectivity*. 2019. Disponível em: (<http://www.ericsson.com/en/ericsson-technology-review/archive/2019/boosting-smart-manufacturing-with-5g-wireless-connectivity>). Acesso em: 17 fev. 2020.
- SANTOS, M. G. A. R. Investigação do uso de SRRs em Antenas de Microfita. *Trabalho de Conclusão do Curso (TCC) - Instituto Federal da Paraíba, João Pessoa, PB*, 2018.
- SEKO, M. H. Antenas Planares de Micro-ondas multibandas para terminais móveis de sistemas de comunicação sem fio. *Dissertação - Universidade de São Paulo, São Paulo, SP*, 2013.
- SENA, F. C. B. Otimização de estruturas dgs e pbg em antenas de microfita retangular usando algoritmo genético. *Tese de Doutorado - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN*, 2018.
- SHIVSHANKAR T.; NAVALE, V. Meander line antenna for lte communications. *International Journal on Recent and Innovation Trends in Computing and Communication* , v. 2, p. 411–416, 2014.
- SILVA, J. C. Análise experimental do efeito de diversas configurações de “inset feed” na alimentação de antenas planares dos tipos retangular, circular e triangular. *Principia, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba*, 2014.
- SILVA, J. L. *Estudo do Comportamento de Antena de Microfita com Substrato Metamaterial*. 2015. *Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal Rural do Semi-Árido, RN*.
- SOUTO, A. H. P. *Análise Numérica e Experimental de Estruturas CSRRs como DGS em Uma Antena de Microfita Bioinspirada para Aplicações em WLAN*. 2019. Trabalho de Conclusão do Curso - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, João Pessoa, PB.
- WANG H.; LIU, S. C. L. L.-W. S. X. Gain Enhancement for Broadband Vertical Planar Printed Antenna With H-Shaped Resonator Structures. v. 62, n. 8, p. 4411–4415, 2014. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*.

WU B.; LI, B. S. T. L.-C. H. Equivalent-circuit analysis and lowpass filter design of split-ring resonator dgs. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, v. 20, n. 14, p. 1943–1953, 2006.

YINGZENG Y.; NA, Z. H. Z. Y.-G. High performance planar antenna array for broadband wlan applications. *2005 IEEE International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation and EMC Technologies for Wireless Communications*, v. 1, p. 220–223, 2005.