

Análise e Projeto de Antenas Patch de Microfita com Substrato Inspirado em Arranjo EBG

Betoven Oliveira de Andrade

Orientador: Prof. Dr. Laércio Martins de Mendonça

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação da UFRN (área de concentração: Telecomunicações) como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica e de Computação.

Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN
Sistema de Bibliotecas - SISBI
Catalogação de Publicação na Fonte. UFRN - Biblioteca Central Zila Mamede

Andrade, Betoven Oliveira de.

Análise e projeto de antenas patch de microfita com substrato inspirado em arranjo EBG / Betoven Oliveira de Andrade. - 2019.
104 f.: il.

Tese (doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação, Natal, RN, 2019.

Orientador: Prof. Dr. Laércio Martins de Mendonça.

1. Antena de microfita - Tese. 2. Substrato EBG - Tese. 3. Substrato impresso 3D - Tese. 4. Rede Neural Artificial - Tese. 5. Equacionamento EBG - Tese. I. Mendonça, Laércio Martins de. II. Título.

RN/UF/BCZM

CDU 621.396.67

Análise e Projeto de Antenas Patch de Microfita com Substrato Inspirado em Arranjo EBG

Betoven Oliveira de Andrade

Tese de Doutorado aprovada em 26 de julho de 2019 pela banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Dr. Laércio Martins de Mendonça (orientador) UFRN

Prof. Dr. Adaildo Gomes D'Assunção (examinador interno) UFRN

Prof. Dr. Antonio Luiz Pereira de Siqueira Campos (examinador interno) UFRN

Prof. Dr. José Patrocínio da Silva (examinador interno) UFRN

Prof. Dr. Humberto Dionísio de Andrade (examinador externo) UFERSA

Prof. Dr. Wellington Candeia de Araújo (examinador externo) UEPB

*“Mas aqueles que esperam no Senhor
renovam as suas forças.
Voam alto como águias;
correm e não ficam exaustos,
andam e não se cansam.”*

ISAÍAS 40:31

*Dedico este trabalho a Deus,
pela força para resistir,
pela disposição de aprender,
pelo Dom de ensinar.*

Agradecimentos

A Deus, pela concessão desta Graça;

À Lizete Maria e Martinho Firmino, meus pais, pelas orações e amor;

À Nayara Rolim Ribeiro, minha noiva, pela fé, paciência, companheirismo e amor;

Aos meus irmãos, Lorena Maria, Van Sóstenes e Glauber, e aos meus sobrinhos, Moisés, Miriã, João Filho e Lara Maria, por existirem;

Ao prof. Dr. Laércio Martins de Mendonça, pela orientação e apoio;

Aos professores do PPgEEC e todos os membros da banca de defesa de doutorado, pela dedicação e ensinamentos;

Aos meus colegas, em especial ao amigo Eliel Poggi, pela jornada;

Aos meus amigos e familiares que torceram, acreditaram e oraram;

À CAPES, pelo apoio financeiro;

Ao pessoal de laboratório da UFRN e IFPB, pelo apoio em aferições de protótipos.

Resumo

Após algumas décadas das primeiras publicações sobre antenas de microfita, as pesquisas e aplicações continuam em expansão. Isso é consequência de várias de suas características atrativas, sobretudo a possibilidade de montagem no mesmo plano dos circuitos transceptores. Acontece que essa vantagem acarreta alguns problemas, como por exemplo, as ondas produzidas pelos circuitos refletem e refratam no interior do substrato, já que esse possui diferentes índices de refração, o que ocasiona correntes superficiais no plano de terra, levando a uma largura de banda estreita e também a uma menor eficiência de radiação e baixo ganho, já que parte da energia é desperdiçada. Para resolver tais características indesejáveis, várias técnicas têm sido investigadas e empregadas, sendo uma das mais promissoras o uso de substratos EBG (*Electromagnetic Band-Gap*). EBG são estruturas periódicas em material dielétrico ou condutivo. Elas propagam as ondas eletromagnéticas em uma frequência específica para todos os estados de polarização e ângulos de incidência, oferecendo características passa-banda e rejeita-banda. Estudos de novas estruturas, técnicas e equacionamentos voltados aos materiais EBG na forma de furos periódicos no substrato são apresentados nesta tese. Os objetivos deste trabalho consistem nos seguintes tópicos: (i) proposição de novas antenas, inclusive antenas com substratos impressos 3D; (ii) proposição de projeto de antenas, através de técnicas adequadas de furos que resultam no não-deslocamento de frequência, ocasionados geralmente por alteração na permissividade após a inserção dos furos; (iii) comprovação de que diferentes formas geométricas de furos não estão relacionadas à variação da frequência de ressonância; (iv) comprovação de que uma geometria não-convencional (não-cilíndrica) pode promover melhorias de eficiência no tempo de projeto; (v) aplicação de uma rede neural artificial capaz de melhorar o tempo de obtenção das perdas de retorno; (vi) proposição de técnicas de baixo custo para o desenvolvimento de antenas com substrato EBG. Metodologia da pesquisa, referencial teórico e as análises citadas são apresentadas ao longo da tese. As validações das propostas dos estudos são apresentadas através de resultados de simulação e medição de protótipos.

Palavras-chave: *Antena de microfita, Substrato EBG, Substrato impresso 3D, Rede Neural Artificial, Equacionamento EBG.*

Abstract

After decades of the first publications on microstrip antennas, research and applications continue to expand. This is the consequence of several of its attractive features, especially the possibility of mounting in the same plane of the transceiver circuits. It turns out that this advantage causes some problems, for example, the waves produced by the circuits reflect and refract inside the substrate, since it has different refractive indexes, which causes surface currents in the earth plane, leading to a bandwidth narrower and also at lower radiation efficiency and low gain, since some of the energy is wasted. To solve such undesirable characteristics, several techniques have been investigated and employed, one of the most promising being the use of Electromagnetic Band-Gap (EBG) substrates. The EBG materials are periodic structures in a dielectric or conductive material. They propagate the electromagnetic waves at a frequency specific to all states of polarization and angles of incidence, offering pass-band and stop-band characteristics. Studies of new structures, techniques and equations for EBG materials in the form of periodic holes in the substrate are presented in this thesis. The objectives of this work consist of the following topics: (i) proposition of new antennas, including antennas with 3D printed substrates; (ii) proposal of antenna design, by means of adequate techniques of holes that result in the non-displacement of frequency, usually caused by change in the permittivity after insertion of the holes; (iii) proof that different geometric shapes of holes are not related to the variation of the resonance frequency; (iv) verifying that a nonconventional (non-cylindrical) geometry can promote efficiency improvements in design time; (v) application of an artificial neural network capable of improving the time to obtain return losses; (vi) proposition of low-cost techniques for the development of antennas with EBG substrate. The methodology of the research, theoretical reference and the analyze cited are presented throughout the work. The validations of the study proposals are presented through simulation results and prototype measurements.

Keywords: *Microstrip antenna, EBG substrate, 3D printed substrate, Artificial Neural Network, EBG equation.*

Sumário

Sumário.....	ix
Lista de Figuras	xii
Lista de Tabelas	xvi
Lista de Símbolos e Abreviaturas.....	xvii
1. Introdução.....	21
1.1 Hipóteses.....	22
1.2 Objetivos.....	23
1.3 Organização da Tese	23
2. Metodologia.....	24
2.1 Pesquisa Bibliográfica	25
2.2 Estudos Computacionais.....	26
2.3 Estudos Experimentais.....	26
2.4 Principais Contribuições da Tese.....	26
3. Referencial Teórico	29
3.1 Antenas	29
3.1.1 Perda de retorno e casamento de impedância.....	30
3.1.2 Largura de banda.....	32
3.1.3 Ganho e diretividade	33
3.1.4 Eficiência e fator de qualidade	34
3.1.5 Polarização	35
3.1.6 Tipos comuns de antenas.....	36
3.2 Antenas de Microfita	37
3.2.1 Fundamentos de radiação	38
3.2.2 Patch retangular.....	39
3.2.3 Alimentação por linha de microfita.....	39

3.2.4 Antenas fractais	41
3.3 Antenas EBG	42
3.3.1 Trabalhos relacionados.....	44
3.4 Antenas Impressas	45
3.4.1 Trabalhos relacionados.....	46
3.5 Redes Neurais Artificiais	47
3.5.1 Neurônio artificial	48
3.5.2 Processos de treinamento	49
3.5.3 Tipos de arquitetura de RNA	49
3.5.4 Exemplo de aplicação de rede Perceptron com regra de Hebb	50
3.5.5 Trabalhos relacionados.....	54
4. Estruturas Propostas e Resultados Experimentais	55
4.1 Projeto de Antenas Patch em Microfita Utilizando Estruturas Inspiradas em EBG Otimizadas por Rede Neural Artificial	55
4.1.1 Introdução.....	55
4.1.2 Antena inspirada em EBG quase-fractal proposta	56
4.1.3 Modelo neural proposto	58
4.1.4 Resultados de projeto	59
4.1.5 Resultados experimentais.....	64
4.1.6 Melhorias obtidas	64
4.2 Técnicas de baixo custo para o desenvolvimento de antenas de microfita inspiradas em EBG	65
4.2.1 Introdução.....	65
4.2.2 Características dos protótipos	66
4.2.3 Resultados	71
4.2.4 Melhorias obtidas	73
4.3 Nova Antena Inspirada em EBG Quadriband em Forma de Cruz.....	74
4.3.1 Introdução.....	74

4.3.2 Caracterização do protótipo	75
4.3.3 Resultados	76
4.3.4 Melhorias obtidas	80
4.4 Invariância de Frequência, Aumento de Ganho e Projeto Rápido em Antenas Inspiradas em EBG Impressas 3D com Furos Quadráticos	80
4.4.1 Introdução.....	81
4.4.2 Projeto e configuração das antenas	82
4.4.3 Desempenho computacional	84
4.4.4 Resultados experimentais e numéricos	85
4.4.5 Melhorias obtidas	90
4.5 Equacionamento para Antenas de Microfita com Substratos EBG	91
4.5.1 Introdução.....	91
4.5.2 Equacionamento proposto	91
4.5.3 Protótipos simulados e resultados numéricos.....	92
4.5.4 Protótipos construídos e resultados experimentais.....	96
4.5.5 Melhorias obtidas	98
5. Conclusões.....	99
Referências	101

Lista de Figuras

Capítulo 2

2.0.1	Fluxograma do desenvolvimento dos artigos.	24
2.4.1	Fluxograma das principais contribuições da tese.	27

Capítulo 3

3.1.1	Duas antenas hipotéticas: transmissora (esq.) e receptora (dir.).	29
3.1.2	Linha terminada em uma carga de impedância Z_L .	30
3.1.3	Esquemático do cálculo da largura de banda de uma antena.	32
3.1.4	Dipolo hipotético com polarização linear vertical.	35
3.2.1	Esquemático de uma antena de microfita típica com <i>patch</i> retangular.	37
3.2.2	Geometrias típicas de <i>patches</i> para antenas de microfita.	38
3.2.3	Efeito de campo de franjas e princípio de radiação.	38
3.2.4	Esquemático de uma linha de microfita hipotética.	39
3.2.5	Esquemático de uma linha de microfita acoplada a uma antena <i>patch</i> retangular.	40
3.2.6	Exemplo de fractal (floco de neve de Koch): (a) Inicializador, (b) Iteração I, (c) Iteração 2, (d) Floco pronto.	41
3.3.1	Exemplos de geometrias: (a) Geometrias de furos, (b) Geometrias de distribuição de furos.	44
3.3.2	Dois refis de material ABS (esq.) e impressora Void1+ (dir.).	46
3.5.1	Neurônio artificial.	48
3.5.2	Código-fonte (em Scilab) do treinamento da RNA para determinação do OU lógico.	52
3.5.3	Resultado do treinamento da RNA, 54 épocas para o ajuste dos pesos e limiar.	53
3.5.4	Código-fonte (em Scilab) da RNA Perceptron para determinação do OU lógico.	53
3.5.5	Resultado da RNA para todos os casos possíveis do OU lógico ('OR')	54

Capítulo 4

4.1.1	(a) Inicializador, (b) Iteração 1, (c) Iteração 2, (d) Aparência da antena.	57
4.1.2	Esquemático da antena inspirada em EBG proposta.	58
4.1.3	Modelo RNA proposto.	59
4.1.4	Esquemático (visão lateral) das perfurações no substrato EBG.	59
4.1.5	Perdas de retorno simuladas para perfurações em 25%, 50% e 100% da espessura do substrato.	60
4.1.6	Carta de Smith simulada para a antena com furos cilíndricos em 25% da espessura do substrato para Freq1= 3,27 GHz e Freq2= 4,51 GHz.	61
4.1.7	Gráficos de treinamento (linhas) <i>versus</i> gráficos de saída da RNA (círculos).	62
4.1.8	Performance da rede em épocas por erro médio quadrático.	62
4.1.9	Saída da RNA para entradas inéditas (círculos) <i>versus</i> dados de comparação provenientes de método numérico (linhas).	63
4.1.10	Tempo médio (segundos) para obtenção da perda de retorno <i>versus</i> frequência utilizando a RNA proposta e utilizando a simulação numérica via HFSS.	63
4.1.11	Perdas de retorno medidas das antenas sem furos e com furos em 80% e perdas de retorno obtidas via RNA das antenas com furos em 20% e 80% da espessura do substrato.	64
4.2.1	Anais do MOMAG 2018: (a) Capa, (b) Informações do artigo, autores e instituições.	65
4.2.2	Esquemático das antenas inspiradas em EBG em 88% (acima) e 100% (abaixo) da espessura do substrato.	67
4.2.3	Materiais para as estruturas na ordem das etapas da produção.	69
4.2.4	Marcação, perfuração e aferição da profundidade do substrato da antena inspirada em EBG em 88% da espessura.	70
4.2.5	Transferência térmica e corrosão da antena inspirada em EBG em 88% da espessura do substrato (acima) e <i>patch</i> por adesivagem da antena em 100% (abaixo).	70
4.2.6	Perda de retorno medida e simulada para a antena inspirada em EBG em 88% da espessura do substrato.	71
4.2.7	Perda de retorno medida e simulada para a antena inspirada em EBG em 100% da espessura do substrato.	72
4.2.8	Carta de Smith medida para a antena inspirada em EBG em 88% (à esq.) e	72

100% (à dir.) da espessura do substrato.	
4.2.9 Ganho simulado (dBi) para a antena inspirada em EBG em 88% da espessura do substrato.	73
4.2.10 Ganho simulado (dBi) para a antena inspirada em EBG em 100% da espessura do substrato.	73
4.2.11 Parâmetros simulados para uma antena <i>patch</i> retangular de referência sem EBG.	73
4.3.1 Programação final do ICEAA/APCW/FEM: (a) Logotipo, (b) Informações destacadas do artigo, autores e instituição.	74
4.3.2 Esquemático da antena inspirada em EBG <i>quadriband</i> em cruz proposta.	75
4.3.3 Carta de Smith simulada da antena proposta. Frequências: Fr1: 2,34 GHz, Fr2: 3,79 GHz, Fr3: 4,44 GHz, Fr4: 5,79 GHz.	77
4.3.4 Diagrama de radiação padrão simulado da antena proposta.	77
4.3.5 Perda de retorno da antena proposta.	77
4.3.6 Perda de retorno <i>versus</i> frequência: antena proposta (simulações) <i>versus</i> antena de referência (medição).	78
4.3.7 Ganho total (dB) simulado da antena proposta.	79
4.3.8 Ganho total (dB) simulado da antena de referência.	80
4.4.1 Esquemático das antenas: (a) Furos tipo cilíndrico, (b) Furos tipo prisma quadrático.	83
4.4.2 Fotografia das antenas inspiradas em EBG: (a) Com furos cilíndricos, (b) Com furos quadráticos.	83
4.4.3 Fotografia da antena sem EBG.	84
4.4.4 Obtenção de imagens ampliadas para a pesquisa.	84
4.4.5 Malha de simulação numérica: (a) Antena sem furos, (b) Antena com furos quadráticos, (c) Antena com furos cilíndricos.	85
4.4.6 Tempo médio de simulação dos protótipos.	85
4.4.7 Perda de retorno <i>versus</i> frequência para as antenas inspiradas em EBG construídas.	86
4.4.8 Perda de retorno <i>versus</i> frequência (simulação e medição) para as antenas inspiradas em EBG.	86
4.4.9 Perda de retorno <i>versus</i> frequência (simulação e medição) para todas as antenas.	87

4.4.10	Carta de Smith medida para todas as antenas: (a) Antena sem EBG, (b) Antena com furos cilíndricos, (c) Antena com furos quadráticos.	87
4.4.11	Diagrama de radiação simulado: (a) Antena sem EBG, (b) Antena com furos cilíndricos, (c) Antena com furos quadráticos.	88
4.4.12	Ganho total (dB) por ângulo (grau) medido para todas as antenas em suas respectivas frequências.	88
4.4.13	Distribuição de corrente de superfície (A/m) na antena sem furos.	89
4.4.14	Distribuição de corrente de superfície (A/m) nas antenas inspiradas em EBG com: (a) Furos cilíndricos, (b) Furos quadráticos.	90
4.5.1	Grupos de protótipos simulados: (a) Antenas com substrato ABS e furos quadráticos preenchidos com ar, (b) Antenas com substrato FR-4 e furos cilíndricos preenchidos com material ABS, (c) Antenas com substratos ABS e furos quadráticos preenchidos com FR-4.	93
4.5.2	Perda de retorno <i>versus</i> frequência (simulação): antenas do grupo 1.	94
4.5.3	Perda de retorno <i>versus</i> frequência (simulação): antenas do grupo 2.	94
4.5.4	Perda de retorno <i>versus</i> frequência (simulação): antenas do grupo 3.	95
4.5.5	Protótipos construídos: (a) Sem furos EBG, (b) Com furos e <i>patch</i> obtido sem auxílio do equacionamento, (c) Com furos e <i>patch</i> obtido com auxílio do equacionamento proposto.	96
4.5.6	Perdas de retorno medidas para os três protótipos construídos.	97

Lista de Tabelas

Capítulo 3

3.5.1	Tabela verdade do OU Lógico ('OR').	50
-------	-------------------------------------	----

Capítulo 4

4.1.1	Taxa de profundidade dos furos, frequência, S_{11} , largura de banda (BW) e magnitude da impedância de entrada da antena (Z).	60
4.2.1	Material utilizado para confecção das antenas inspiradas em EBG.	68
4.3.1	Parâmetros diversos - antena proposta <i>versus</i> antena de referência - frequência, S_{11} , magnitude da impedância de entrada da antena (Z) e largura de banda (MHz e percentual).	78
4.4.1	Principais parâmetros dos protótipos.	89
4.5.1	Grupos de antenas simuladas e suas características: frequência, material do substrato, material do furo, tipo de furo, quantidade de furos, volume de furo unitário, <i>pitch</i> , W e L do <i>patch</i> .	93
4.5.2	Frequência e largura de banda dos protótipos construídos.	97

Lista de Símbolos e Abreviaturas

3DP 3D *Printing* – impressão 3D.

α	<i>Pitch</i> (distância, centro-a-centro, entre os furos).
β	Constante de fase.
Γ	Coefficiente de reflexão de voltagem.
Δh	Espessura do substrato.
ΔL	Comprimento do substrato / extensão do comprimento de L, no <i>patch</i> retangular, devido aos campos de borda – comprimento <i>Fringing</i> ;
ΔW	Largura do substrato.
ε	Permissividade.
ε_{eff}	Permissividade elétrica relativa efetiva.
ε_r	Permissividade elétrica relativa, constante dielétrica do substrato.
$\varepsilon_{r_{hole}}$	Permissividade do material de preenchimento dos furos EBG.
$\varepsilon_{r_{mat}}$	Permissividade do material onde foram feitos os furos EBG.
$\varepsilon_{r_{eff}(substrate)}$	Permissividade efetiva do substrato EBG.
η	Taxa de aprendizagem de uma RNA.
θ	Ângulo de elevação / bias, limiar de ativação de uma RNA.
λ	Comprimento de onda.
λ_0	Comprimento de onda no espaço livre.
μ	Permeabilidade magnética.
π	Constante 3,1415...
φ	Ângulo de azimuth.
Ω	Ohm.
∞	Infinito.

A_c Área do círculo.

A_e Área efetiva da antena.

B	Vetor campo magnético.
$BW\%$	Largura de banda percentual.
C	Capacitância.
D	Diretividade.
E	Vetor campo elétrico.
e_r	Eficiência de radiação da antena.
F_c	Frequência central.
F_i	Limite inferior da banda.
F_r	Frequência de ressonância
F_s	Limite superior da banda.
F_0	Frequência característica.
FR-4	Substrato dielétrico a base de fibra de vidro.
g	Largura das reentrâncias do <i>inset feed</i> .
G	Ganho da antena.
$g(.)$	Função de ativação de uma RNA.
h	Espessura do substrato dielétrico.
$hole\%$	Porcentagem do material de preenchimento dos furos.
I	Corrente elétrica.
I_L	Corrente na carga.
$I(z)$	Corrente em relação à z .
l	Linha de transmissão.
L	Indutância / comprimento do <i>patch</i> retangular / comprimento da cruz maior da antena quase-fractal em cruz.
L'	Comprimento da cruz menor da antena quase-fractal em cruz.
$\log$	Logaritmo de base 10.
$mat\%$	Porcentagem do material onde foram feitos os furos.
n	Número de furos no substrato dielétrico.
P_e	Potência entregue na entrada da antena.
P_r	Potência efetivamente radiada.
P_T	Potência total radiada.
Q	Fator de qualidade da antena.
R	Resistência.
RL	<i>Return loss</i> – perda de retorno.

R_p	Resistência de perdas.
R_r	Resistência de radiação.
r	Raio do cilindro.
S_s	Lado do quadrado.
S_{11}	Perda de retorno da antena; referência a porta 1 do analisador vetorial de redes.
$\tan$	Tangente.
u	Potencial de ativação de uma RNA.
V	Vetor da velocidade de propagação da onda / tensão.
V_L	Voltagem na carga.
$V(z)$	Voltagem em relação a z .
V_{hole}	Volume de uma unidade de furo EBG.
V_{mat}	Volume do material onde foram feitos os furos EBG.
V_{total}	Volume total do substrato EBG.
W	Largura de uma linha de transmissão de microfita / largura do <i>patch</i> retangular / largura da cruz maior da antena quase-fractal em cruz / peso sináptico de um RNA.
W'	Largura da cruz menor da antena quase-fractal em cruz.
y	Sinal de saída de uma RNA.
Y_0	Comprimento das reentrâncias do <i>inset feed</i> .
X	Sinal de entrada de uma RNA;
z	Variável espacial.
Z_{in}	Impedância de entrada.
Z_L	Impedância na carga.
Z_0	Impedância característica da linha.

ABS	Acrylonitrile Butadiene Styrene.
BW	<i>Bandwidth</i> – largura de banda.
CPW	<i>Coplanar Waveguide</i> – guia de ondas coplanar.
dB	Decibel (unidade logarítmica – um décimo de um bel).
dBd	Unidade logarítmica para expressar ganho em relação a uma antena dipolo.
dBi	Unidade logarítmica para expressar ganho em relação a uma antena

	isotrópica.
DC	<i>Direct Current</i> - corrente continua.
EBG	<i>Electromagnetic Band-Gap</i> .
Fator-Q	Fator de Qualidade da antena.
FDM	<i>Fused Deposition Modeling</i> - modelagem de deposição fundida.
FEM	Método dos Elementos Finitos.
GPS	Sistema de Posicionamento Global.
HFSS	<i>High Frequency Structural Simulator</i> – simulador estrutural de alta frequência.
IRDD	Intensidade de Radiação em uma Dada Direção.
IRMTD	Intensidade de Radiação Média relativa a Todas as Direções.
LM	Metodologia de Levenberg-Marquardt.
OR	Ou Lógico.
MIMO	<i>Multiple-Input Multiple-Output</i> - múltiplas entradas e múltiplas saídas.
PBG	<i>Photonic Band Gap</i> .
PET	Poli tereftalato de Etileno.
PLA	Poliácido Láctico.
PMRA	Potência Máxima Recebida.
PMRAR	Potência Máxima Recebida a partir da Antena de Referência.
RFID	<i>Radio-Frequency Identification</i> .
RNA	Rede Neural Artificial.
ROE	Relação de Ondas Estacionárias.
SMA	<i>SubMiniature version A</i> (tipo de conector).
SWR	<i>Standing Wave Ratio</i> - relação de ondas estacionárias.
UFRN	Universidade Federal do Rio Grande do Norte.
VSWR	<i>Voltage Standing Wave Ratio</i> - relação de onda estacionária de tensão.
Wi-Fi	<i>Wireless fidelity</i> .
WiMAX	<i>Worldwide Interoperability for Microwave Access</i> .

Capítulo 1

Introdução

Numa pesquisa da empresa Cisco [1] apresentada em 2017 são mostrados números impactantes com relações ao tráfego de dados em redes móveis: ao final de 2016 o tráfego global de dados mensal foi de 7,2 exabytes, havendo um aumento de 63% em relação ao final de 2015. No último quinquênio houve um crescimento de 18 vezes no tráfego de dados móveis. A quarta geração (4G) da telefonia móvel compôs 26% das conexões, porém esses foram responsáveis por 69% do tráfego via redes móveis. Com relação ao tráfego total por parte dos dispositivos móveis, 60% desse foi via Wi-Fi ou *Femtocell* (redes de pequenas células). Estima-se 49 exabytes/mês de tráfego móvel em 2021 e um aumento de três vezes na velocidade da conexão. Em 2021 o Wi-Fi ainda estará bem presente em todo o tráfego IP, sendo responsável por 50% desse, contra 30% cabeado e 20% de redes móveis.

Diante da realidade e das estimativas apresentadas, é inegável a importância das antenas nesse contexto. “Uma antena é uma estrutura intermediária entre o espaço livre e o dispositivo de guiamento” [2], ou seja, são dispositivos de início e/ou fim em qualquer sistema de telecomunicações sem fio. Uma categoria de antenas mais específica, as antenas de microfita, é representada por dispositivos leves e de baixos volume e custo, além de poderem ser empregadas no mesmo plano dos circuitos transceptores, características pelas quais se tornaram de grande empregabilidade em dispositivos móveis. As pesquisas acerca das antenas de microfita foram impulsionadas a partir dos anos 1970, quando se demandava por antenas de baixo perfil para serem utilizadas em satélites, veículos espaciais e mísseis teleguiados [3]. Em alguns sistemas, como *smartphones*, as antenas precisam operar em várias faixas de frequência, para diferentes serviços além da comunicação móvel, como Wi-Fi, *bluetooth* e GPS.

Para suprir múltiplos serviços, as antenas de microfita podem possuir características banda larga ou multibanda. O termo multibanda diz respeito à característica de uma antena poder operar em múltiplas faixas de frequência, sendo assim, uma única antena com essa propriedade é capaz de ser utilizada em diversos serviços em um mesmo dispositivo, com a vantagem de ocupar pouco espaço. Para alcançar um comportamento multibanda em antenas de microfita é possível fazer uso da

teoria dos fractais de Mandelbrot [4] em seus *patches*. Uma quase-fractalidade aplicada a um *patch* pode gerar múltiplos comprimentos de onda e consequentemente múltiplas frequências de ressonâncias para a antena de microfita [5]. Outro desafio a ser enfrentado pelas antenas de microfita é o ganho reduzido e/ou largura de banda estreita. Uma solução relativamente recente para melhorias nesses aspectos é o uso de antenas EBG (*Electromagnetic Band-Gap*)¹. Essa tecnologia, quando empregada a substratos na forma de furos, promove um meio híbrido e possui, portanto, uma constante dielétrica que engloba materiais diferentes. Em geral os furos são preenchidos com ar, o que gera um meio de isolamento alterado, diminuindo correntes superficiais indesejadas, melhorando a eficiência de radiação e o ganho. Diversos problemas sobre a utilização de EBG em substratos de antenas de microfita são encontrados na literatura.

Nesta tese são propostas soluções para os seguintes problemas: (i) tempo de projeto muito oneroso mesmo com o auxílio de computadores de alto desempenho: são propostas duas soluções eficientes para esse problema: o uso de uma geometria de furo não-convencional e o uso de uma Rede Neural Artificial (RNA); (ii) a inserção dos furos altera a permissividade elétrica e consequentemente a frequência de uma antena: são propostos equacionamentos para obter a permissividade efetiva de um substrato EBG; (iii) a construção dos furos em substratos convencionais pode inviabilizar a confecção de estruturas quando não se dispõe dos equipamentos necessários: são propostas técnicas de baixo custo para viabilizar a produção de furos inspirados em EBG em substratos convencionais, além da produção de substratos inspirados em EBG em impressoras 3D; (iv) *patches* ou planos de terra com formas complexas podem dificultar a produção de antenas com substrato EBG: é proposta a utilização de perfuração parcial em um dos lados de uma antena de *patch* quase-fractal; (v) por fim, otimizou-se uma antena quase-fractal proposta durante o mestrado do autor desta tese: nesse caso foram feitas alterações no *patch* que, associado ao uso de substrato inspirado em EBG, melhoraram o diagrama de radiação da antena.

1.1 Hipóteses

As conjecturas com relação as principais vertentes da pesquisa são:

- Grande parte dos desvios de frequência ocorridos entre projetos analíticos e medições (comumente encontrados na literatura) de antenas de microfita com

¹ As estruturas produzidas pelo autor e apresentadas nesta tese são consideradas ‘inspiradas em EBG’ por certas circunstâncias, como estudo de perfurações parciais e ausência de estudos dos modos ressonantes.

substratos EBG, são decorrentes do uso, nesses projetos, da constante dielétrica do substrato no qual os furos foram produzidos, desconsiderando as alterações de permissividade causadas pelo material dos furos – comumente ar.

- No tocante aos furos EBG em substratos de antenas de microfita, a hipótese é que o uso de uma geometria não-cilíndrica não promoverá deslocamentos de frequência ou alterações de largura de banda, desde que utilizados os mesmos volumes do arranjo de referência (com furos cilíndricos).

1.2 Objetivos

A pesquisa tem por finalidade geral, propor soluções para diversos problemas comuns na área de antenas de microfita com substrato EBG (ou inspirados nesses) de modo que tais soluções possam contribuir para o estado da arte. Os objetivos específicos são:

- Proposição de equações que permitam calcular adequadamente a permissividade de um substrato EBG (ou inspirado em EBG), levando em conta que tais substratos possuem dois materiais. Com isso, se visa evitar ou minimizar deslocamentos entre a frequência de ressonância medida e o projeto analítico, já que esses deslocamentos são comuns na literatura.
- Provar que uma geometria não-convencional de furos EBG, por si só, não é capaz de promover deslocamentos de frequência ou alterações de largura de banda. Tal objetivo visa impulsionar o uso de geometrias não-cilíndricas, já que a geometria cilíndrica é muito menos eficiente em termos de tempo de processamento durante as simulações.

Outros objetivos específicos de menor relevância são: proposições de novas técnicas de construção de substratos inspirados em EBG, aplicação pontual de uma Rede Neural Artificial para rápida obtenção da perda de retorno e proposição de uma nova antena *quadriband*.

1.3 Organização da Tese

Esta tese está dividida em cinco capítulos, de forma a descrever os aspectos metodológicos e os conteúdos teóricos e experimentais. No capítulo 2 é apresentada a metodologia utilizada na pesquisa. No capítulo 3 é abordado o referencial teórico necessário à compreensão dos resultados apresentados nesta tese. No capítulo 4 são apontadas as linhas de pesquisas. O capítulo 5 consiste da conclusão da tese, incluindo sugestões para trabalhos futuros.

Capítulo 2

Metodologia

Neste capítulo é explicado como a pesquisa se desenvolveu, desde a definição do tema, passando pela análise do estado da arte, até a publicação de artigos em congressos/periódico e, por fim, culminando nesta tese. Na Figura 2.0.1 é exposto um fluxograma contendo as fases de desenvolvimento dos artigos produzidos.

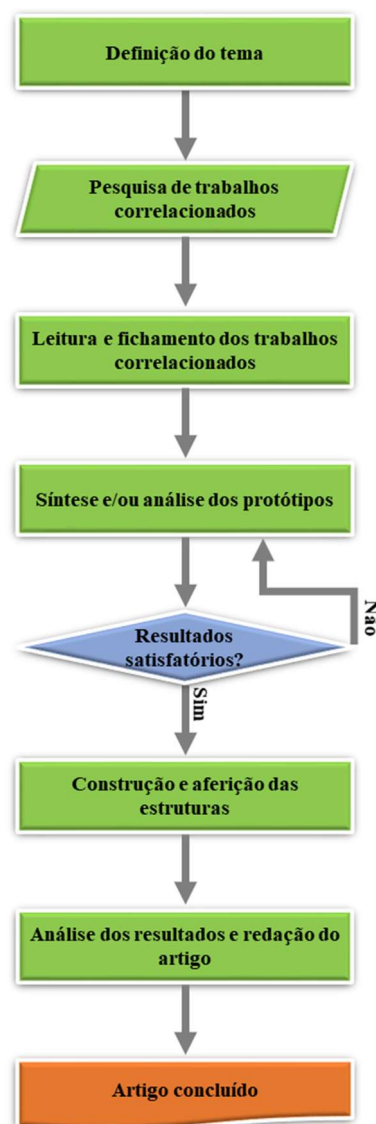


Figura 2.0.1: Fluxograma do desenvolvimento dos artigos. Fonte: Autoria própria.

Os estudos que culminaram nos artigos (e outros que também constam nesta tese) podem ser, de forma resumida, categorizados em dois tipos quanto à pesquisa científica:

- *Explicativa*, com relação aos objetivos;
- *Experimental*, com base nos procedimentos utilizados.

Para Gil [6] (2002, p. 42), as pesquisas explicativas “têm como preocupação central identificar os fatores que determinam ou que contribuem para a ocorrência dos fenômenos”. Com relação à categorização em experimental, Gil (2002, p. 47) afirma que “essencialmente, a pesquisa experimental consiste em determinar um objeto de estudo, selecionar as variáveis que seriam capazes de influenciá-lo, definir as formas de controle e de observação dos efeitos que a variável produz no objeto”.

De acordo com Lakatos e Marconi [7] (2003, p. 190) é possível categorizar ainda em Pesquisa de Laboratório, pois: “ela descreve e analisa o que será ou ocorrerá em situações controladas. Exige instrumental específico, preciso, e ambientes adequados”. As aferições realizadas durante o procedimento de pesquisa permitem, também, essa categorização.

2.1 Pesquisa Bibliográfica

O radical grego ‘bíblion’, da palavra bibliográfica, remete a livro. Porém o termo é mais abundante. Conforme Macedo [8] (1995, p. 13), a pesquisa bibliográfica, em sentido restrito, pode ser definida como: “... seleção de documentos que se relacionam com o problema de pesquisa (livros, verbetes de enciclopédia, artigos de revistas, trabalhos de congressos, teses, etc.)”, de modo que seu objetivo é evitar que o pesquisador busque resolver problemas já solucionados anteriormente.

Para Marconi e Lakatos [7], a pesquisa bibliográfica é composta de oito fases: (i) escolha do tema, (ii) elaboração do plano de trabalho, (iii) identificação, (iv) localização, (v) compilação, (vi) fichamento, (vii) análise e interpretação, e (viii) redação.

A escolha do tema central (i) e temas decorrentes se deram por pesquisa do autor e orientador com publicações recentes acerca de antenas de microfita, além da convivência com outros pesquisadores da mesma instituição de ensino que trabalham nessa linha de pesquisa. A elaboração do plano de trabalho (ii) foi a definição do escopo dos artigos e da tese. A identificação (iii), que consiste em catalogar fontes de obtenção de obras, foi facilitada, já que o autor teve acesso ao portal do IEEE Xplore [9], que compila os artigos dos principais periódicos e conferências. A localização (iv) foi pelo referido portal, livros físicos e mídia digital obtida da internet. A compilação (v) de livros ou outras publicações por meio de fotocópias, etc. não foi necessária. O fichamento (vi) foi realizado com o auxílio do sistema de referenciamento de texto Zotero [10], e em papel, para alguns casos. A análise e interpretação (vii) foram essenciais para a escolha dos melhores trabalhos, servindo de inspiração na busca de problemas/resoluções para a pesquisa, além de ajudar na posterior redação (viii) dos artigos e desta tese.

Após a definição dos temas, o primeiro passo para a produção dos artigos desta tese foi a leitura de artigos de periódicos, recentes e clássicos. Além de livros, artigos de conferências e sites confiáveis. O passo seguinte foi à elaboração de fichamentos a fim de compilar de forma resumida os principais trabalhos relacionados. Para Severino [11],

O fichário de documentação bibliográfica constitui um acervo de informações sobre livros, artigos e demais trabalhos que existem sobre determinados assuntos, dentro de uma área do saber. Sistemáticamente feito, proporciona ao estudante rica informação para seus estudos. (SEVERINO, 2007, p. 70).

Durante a fase de análise e interpretação dos trabalhos selecionados e fichados, surgiu inspiração para a resolução de problemas na área, o qual se buscou resolver inicialmente através de métodos computacionais.

2.2 Estudos Computacionais

Os estudos computacionais consistiram principalmente de simulações numéricas dos protótipos e de um modelo neural. Essas simulações permitiram uma maior precisão dos resultados medidos em uma fase posterior de construção e aferição das estruturas.

Soluções analíticas na forma de equações e fórmulas matemáticas em geral também foram utilizadas durante a pesquisa. Uma das vertentes da pesquisa consistiu, inclusive, no desenvolvimento e proposição de equações. As equações desenvolvidas e as provenientes de outras fontes foram colocadas em planilhas ou programas de computador, para agilizar tarefas rotineiras.

2.3 Estudos Experimentais

Em vários momentos durante a pesquisa foi necessária à construção de estruturas planares que pudessem validar as soluções propostas. Foram construídas desde antenas convencionais a antenas inspiradas em EBG, com substratos comuns e impressos. Um dos trabalhos, inclusive, descreve técnicas simples (*guideline*) para a produção de antenas inspiradas em EBG em substratos convencionais. Trata-se de técnicas que foram utilizadas para contornar problemas de indisponibilidade de equipamentos de alto custo.

Após a construção dos protótipos de antenas, os mesmos foram testados em laboratório usando analisador vetorial de redes. As respostas obtidas das medições foram confrontadas com as simulações e/ou protótipos de referência, a fim de comprovar/validar melhorias obtidas.

2.4 Principais Contribuições da Tese

Além dos capítulos de Introdução (1) e Metodologia (2), são apresentados os seguintes capítulos: Referencial Teórico (3), Estruturas Propostas e Resultados Experimentais (4), Conclusões (5) e Referências. Vale destacar que o capítulo 4 é o

mais importante, já que trata especificamente dos resultados obtidos em diversos estudos realizados durante a pesquisa e que constituem as contribuições à tese.

Na Figura 2.4.1 é exposto um fluxograma das principais contribuições/vertentes desta tese. As descrições dos módulos são explanadas em seguida.

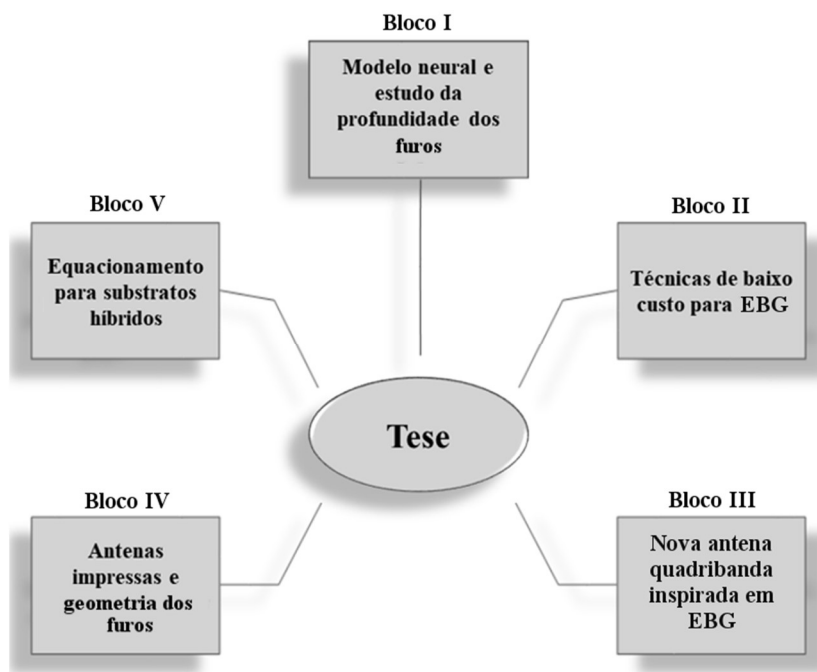


Figura 2.4.1: Fluxograma das principais contribuições da tese. Fonte: Autoria própria.

BLOCO I – Modelo neural e estudo da profundidade dos furos: essa vertente de pesquisa está contida no subcapítulo 4.1 (Projeto de Antenas Patch em Microfita Utilizando Estruturas Inspiradas em EBG Otimizadas por Rede Neural Artificial). É demonstrado como uma antena com uma perfuração parcial de 25% obteve resultados superiores a uma antena sem furos e antenas com furos em 50% e 100% de profundidade. Essa técnica reduziu o deslocamento das bandas e apresentou maiores larguras de banda. Uma perfuração parcial é interessante, ao passo que permite que se construa uma antena perfurando apenas o lado menos complexo da estrutura. Nesse estudo também foi aplicada uma Rede Neural Artificial treinada em *backpropagation* com metodologia de Levenberg-Marquardt para uma definição rápida e eficiente da perda de retorno quando dadas como entradas a profundidade dos furos e as frequências de ressonância de interesse, reduzindo o total de tempo despendido com simulações numéricas.

BLOCO II – Técnicas de baixo custo para EBG: essa vertente de pesquisa está contida no subcapítulo 4.2 (Técnicas de Baixo Custo Para o Desenvolvimento de Antenas de Microfita Inspiradas em EBG). Foram apresentadas técnicas simples para a produção de antenas de microfita inspiradas em EBG. Duas antenas otimizadas foram construídas com materiais de baixo custo, uma com perfuração parcial em 88% e outra em 100% da espessura do substrato. Os parâmetros de ganho e largura de banda das

estruturas propostas são positivos se comparados a antenas sem furos encontradas na literatura, bem como em relação aos dados provenientes da antena de referência, simulada. Tais técnicas podem ser utilizadas em pesquisas de antenas de microfita com substratos inspirados em EBG.

BLOCO III – Nova antena EBG *quadriband*: essa vertente de pesquisa está contida no subcapítulo 4.3 (Nova Antena Inspirada em EBG Quadriband em Forma de Cruz). Foram apresentados dados obtidos computacionalmente para uma nova antena inspirada em EBG multibanda com *patch cross-shaped*, os quais foram confrontados com dados oriundos de uma antena de referência. A antena proposta melhorou o diagrama de radiação e promoveu melhor ganho. A antena proposta dispõe ainda de quatro bandas de operação, contra duas da antena de referência. Outras vantagens da antena proposta são maior facilidade de projeto e uso de *inset feed* para um casamento de impedância simplificado.

BLOCO IV - Antenas impressas e geometria dos furos: essa vertente de pesquisa está contida no subcapítulo 4.4 (Invariância de Frequência, Aumento de Ganho e Projeto Rápido em Antenas Inspiradas em EBG Impressas 3D com Furos Quadráticos). Foram construídas três antenas com substratos ABS, impressos em impressoras 3D, uma sem furos e duas com furos tipo cilíndrico e prisma quadrático. A pesquisa revelou que a geometria dos furos não provoca mudanças significativas nas frequências/larguras de bandas, desde que utilizados os mesmos volumes do arranjo de referência. A pesquisa revelou ainda, que a antena com furos não-convencionais quadráticos gerou um esforço computacional muito menor durante as simulações, além de melhor ganho e maior eficiência de radiação.

BLOCO V – Equacionamento para substratos EBG: essa vertente de pesquisa está contida no subcapítulo 4.5 (Equacionamentos para Antenas de Microfita com Substratos EBG). Foi desenvolvido um equacionamento que possibilita obter a constante dielétrica efetiva de um substrato EBG, considerando o material no qual os furos foram produzidos e o material dos furos em si. Tal equacionamento permite que antenas possam ser projetadas corretamente, de acordo com suas equações analíticas, evitando que haja deslocamento de frequência em relação a uma antena de referência, de *patch* idêntico, porém sem EBG.

Por fim, enfatiza-se que, entre os blocos apresentados, o ‘IV’ e o ‘V’ representam as maiores contribuições desta tese. São eles que confirmam as hipóteses levantadas no capítulo 1 - Introdução.

Capítulo 3

Referencial Teórico

O referencial teórico é composto dos conceitos mais importantes sobre as temáticas envolvidas, permitindo que os leitores possam ter noções suficientes para compreender o estado da arte e os resultados da pesquisa. Portanto, neste capítulo são apresentados os fundamentos e parâmetros básicos de antenas, antenas de microfita, métodos de alimentação, comportamento multibanda, fractalidade, *Electromagnetic Band-Gap* (EBG), antenas impressas 3D e Redes Neurais Artificiais (RNA).

3.1 Antenas

Antena é um sistema irradiante utilizado para transmitir ou receber energia eletromagnética. Um transmissor trata/modula uma informação original e a mesma é transmitida (ou guiada) em forma de sinal elétrico até a antena desse transmissor; o campo elétrico põe os elétrons livres da antena em movimento gerando radiação eletromagnética, ou seja, a energia elétrica é transformada em fótons pela antena transmissora. Na antena receptora ocorre o processo inverso, a energia eletromagnética recebida movimenta os elétrons livres da antena receptora fazendo gerar um sinal elétrico que é conduzido até o receptor. A informação recebida é resguardada porque a antena atua como transdutor, assim, na antena receptora é induzida a mesma referência de corrente e tensão alternada da antena transmissora. De forma simplificada Balanis [12] define antena como “uma estrutura intermediária entre o espaço livre e o dispositivo de guiamento”. Na Figura 3.1.1 é apresentado um esquemático de duas antenas dipolo hipotéticas, uma transmissora e outra receptora.

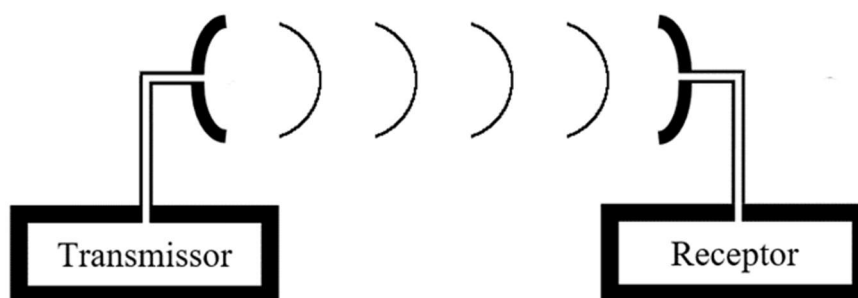


Figura 3.1.1: Duas antenas hipotéticas: transmissora (esq.) e receptora (dir.). Fonte: Autoria própria.

Observando a representação hipotética das antenas dipolo da Figura 3.1.1, percebe-se que cada uma se assemelha a um circuito aberto, porém um circuito aberto não pode promover corrente e sem corrente não há radiação. No entanto, existe um efeito capacitivo entre os dois lados de uma antena, de modo que, com o aumento da frequência surge um caminho de baixa impedância. Em outras palavras, uma antena

comporta-se como um circuito RLC (Resistência (R), Indutância (L), Capacitância (C)). Os tópicos das seções a seguir trazem os principais parâmetros de antenas, além dos tipos mais comuns.

3.1.1 Perda de retorno e casamento de impedância

Em uma antena ideal não haveria perda de retorno. Nas antenas reais essa perda deve ser o mínimo possível. A perda de retorno é comumente mensurada em escala logarítmica, o decibel (dB). Quando a impedância de entrada da antena não corresponde à impedância de saída do dispositivo de guiamento (linha de microfita, cabo coaxial, guia de ondas, etc.) ocorre um descasamento de impedância. O descasamento faz com que parte da energia da antena volte de encontro a energia que sai do dispositivo de guiamento em direção a antena, gerando as ondas estacionárias e consequentemente as perdas. Sendo assim, parte da energia não é transmitida.

Pozar [13] apresenta algumas teorias e formulações que são abordadas de forma sucinta abaixo. Na Figura 3.1.2 é apresentado um exemplo de linha de transmissão cuja terminação se dá em uma carga de impedância Z_L . Vale ressaltar que uma antena pode ser entendida como uma carga para a linha.

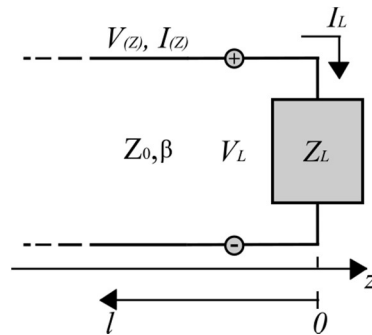


Figura 3.1.2: Linha terminada em uma carga de impedância Z_L . Fonte: Autoria própria, adaptado de [13].

Na Figura 3.1.2, Z_0 é a impedância característica da linha, representa a relação de tensão para corrente da onda viajante. A onda incidente é representada por $V_0^+ e^{-j\beta z}$, onde β é a constante de fase e z (minúsculo) a variável espacial. $V(z)$ e $I(z)$ correspondem a tensão e corrente com relação a z . V_L , I_L , e Z_L são respectivamente tensão, corrente e impedância na carga. O l (minúsculo) se refere à linha.

Quando $Z_L \neq Z_0$ (descasamento), Z_L deve ser a relação de tensão para corrente. Para tanto, o somatório das ondas incidentes e refletidas deve ser igual à tensão total na linha, de forma análoga para a corrente total.

A amplitude (normalizada) da tensão da onda refletida em relação à tensão da onda incidente é definida como coeficiente de reflexão de tensão, conforme equação (1):

$$\Gamma = \frac{V_0^-}{V_0^+} = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \quad (1)$$

A voltagem e corrente na linha são uma superposição das ondas incidentes e refletidas, chamadas ondas estacionárias [13]. Se $Z_L = Z_0$, implica $\Gamma = 0$, ou seja, não haveria onda refletida. Na prática $0 < \Gamma < 1$. Se $\Gamma = 0$, potência máxima seria entregue a carga, se $\Gamma = 1$ não haveria potência alguma entregue a carga. Quando nem toda potência disponível no gerador é entregue a carga ocorre o que é chamado de perda de retorno (dada em dB), a qual pode ser obtida pela equação (2):

$$RL = -20 \log|\Gamma| \text{ dB} \quad (2)$$

Se $\Gamma = 0 \rightarrow RL = \infty \text{ dB}$, carga casada.

Se $\Gamma = 1 \rightarrow RL = 0 \text{ dB}$, reflexão total.

O aumento de Γ eleva a razão de V_{max} por V_{min} (valores máximos e mínimos para a tensão na linha). Essa medida de descasamento da linha é chamada de SWR (*Standing Wave Ratio* - Relação de Ondas Estacionárias, ROE) ou VSWR (*Voltage Standing Wave Ratio* - relação de onda estacionária de tensão), a qual pode ser obtida pela equação (3):

$$VSWR = \frac{V_{max}}{V_{min}} = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|} \quad (3)$$

$1 \leq VSWR \leq \infty$. Se $VSWR = 1$, carga casada.

Se desconsiderado as perdas na linha, o fluxo de potência é constante, mas a amplitude da voltagem (ao menos para linha descasada) varia com a posição na linha. Em outras palavras, a impedância na linha varia com a posição, conforme equação (4):

$$Z_{in} = \frac{Z_L + jZ_0 \tan \beta l}{Z_0 + jZ_L \tan \beta l} \quad (4)$$

A equação (4) retorna a impedância de entrada de um comprimento de linha de transmissão com uma impedância de carga arbitrária.

Nesta tese o leitor verá o termo S_{11} , em referência a perda de retorno (RL). S_{11} é uma referência técnica ao analisador vetorial de redes utilizado na medição, trata-se da relação de entrada e saída do sinal na porta 1. O termo S_{11} é utilizado nos gráficos desta tese (mesmo para simulações), pois não convém utilizar o termo ‘perda’ de retorno em um gráfico que contém valores negativos

Em uma antena real é comum adotar que, para um funcionamento eficiente a mesma tenha um S_{11} menor que -10 dB (o que corresponde a 90% de energia entregue pela antena) na (s) frequência (s) de ressonância. É abaixo desse limiar de -10 dB que se define a largura de banda da antena.

3.1.2 Largura de banda

A largura de banda define a faixa de frequência na qual a antena pode funcionar com qualidade. É sabido que, se obtida uma relação de VSWR de 1:1 (o denominador é sempre 1) toda a energia seria radiada, do contrário, um VSRW de ∞ :1 indicaria uma reflexão total. A largura de banda é definida como um valor em Hz (MHz, GHz, etc.) para o qual a antena proporciona um VSWR menor que 2:1. Um valor típico é 1,5:1, mas isso depende de características específicas exigidas pelo sistema, bem como de limitações do tipo de antena. No exemplo da Figura 3.1.3, a banda foi definida na linha de corte de -10 dB de S_{11} ; F_c é a frequência central, F_s e F_i são os limites superior e inferior da banda, respectivamente.

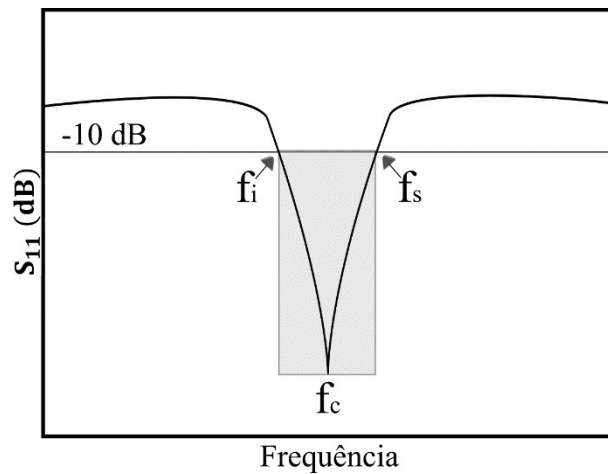


Figura 3.1.3: Esquemático do cálculo da largura de banda de uma antena. Fonte: Autoria própria.

É comum também o cálculo da largura de banda em termos percentuais, o que considera a frequência central, conforme equação (5):

$$BW\% = 100 * \frac{F_s - F_i}{F_c} \quad (5)$$

As antenas de microfita, especificamente, têm larguras de banda estreita [2]. Várias técnicas têm sido estudadas para resolver esse problema. De acordo com [3], a impedância de entrada característica de antenas *patch* geralmente se comporta de forma semelhante a um circuito sintonizado simples, onde a largura de banda de 3 dB é aproximadamente $(100/Q)$ por cento, sendo Q o fator- Q do circuito sintonizado equivalente. Um substrato de permissividade baixa e/ou de espessura larga reduz Q , aumentando a largura de banda.

A busca pelo aumento da largura de banda em antenas de microfita é objeto de muitas pesquisas científicas. O autor desta tese utilizou reduções no plano de terra com esse objetivo, em antenas desenvolvidas durante o mestrado [14]. Um outro parâmetro no qual muitas pesquisas em antenas de microfita buscam otimizar é o ganho, apresentado no tópico a seguir.

3.1.3 Ganho e diretividade

Uma antena isotrópica é uma antena hipotética na qual a radiação se dá uniformemente em todas as direções. Qualquer antena que apresente aspectos direcionais em relação a uma antena isotrópica possui um ganho [15], o qual é definido pela equação (6):

$$G = \frac{PMRA}{PMRAR} \quad (6)$$

Onde, PMRA é a potência máxima recebida de uma antena de interesse e PMRAR é a potência máxima recebida da antena de referência, a qual pode ser a isotrópica.

A antena dipolo também é bastante utilizada como antena de referência. Daí a razão de ganhos serem comumente expressos em dBi e dBd. Para expressar o resultado em dBi, faz-se: $10\log_{10}G$, onde G foi definido em (6).

Mesmo num dipolo curto há ocorrência de ganho em relação a uma antena isotrópica (cuja fonte é pontual). Na verdade, numa antena cujo comprimento seja diferente de zero existe radiação preferencial, em uma direção específica (θ, φ) , o que pode ser denotado como ganho de diretividade da antena ou simplesmente diretividade, D [15]. A diretividade é obtida da razão entre a intensidade de radiação da antena em determinada direção $\Phi(\theta, \varphi)$ e a potência média radiada relativa a todas as direções ao longo de uma esfera imaginária posicionada no campo distante, conforme equação (7):

$$D = \frac{IRDD}{IRMTD} \quad (7)$$

Onde, IRDD é a intensidade de radiação em uma dada direção e IRMTD é a intensidade de radiação média, relativa a todas as direções.

A radiação média para uma esfera é $1/4\pi$ vezes P_T (potência total radiada), portanto a diretividade pode ser dada pela equação (8):

$$D = \frac{4\pi\Phi(\theta, \varphi)}{P_T} \quad (8)$$

Em essência, o ganho e a diretividade são praticamente iguais, com uma pequena diferença nos termos de potência avaliados. A diferença fundamental é a consideração das perdas de potência nas partes de condutividade e dielétricas da antena [16]; portanto:

- D é a razão entre a intensidade de radiação da antena de interesse e a intensidade de radiação da antena de referência, a qual irradia a mesma potência da antena de interesse.
- G é a razão entre intensidade de radiação da antena de interesse e a intensidade de radiação da antena de referência, a qual irradia a mesma potência oferecida na entrada da antena de interesse, porém sem considerar perdas resistivas da antena.

Ganho e diretividade se relacionam com a eficiência de radiação da antena, conforme equação (9):

$$G = e_r \cdot D \quad (9)$$

Onde, e_r é a eficiência de radiação da antena (tema abordado na próxima seção).

O ganho pode ser relacionado ainda com a área efetiva da antena, conforme equação (10):

$$G = A_e \cdot \frac{4\pi}{\lambda} \quad (10)$$

Onde, λ é o comprimento de onda e A_e é a área efetiva da antena.

3.1.4 Eficiência e fator de qualidade

De acordo com Cavalcanti et al. [16], a eficiência de radiação (e_r) de uma antena pode ser denotada como a razão entre a potência efetivamente radiada (P_r) no meio e a potência entregue (P_e) na entrada da antena, ou seja, em seus terminais. A eficiência de radiação (e_r) pode ser calculada conforme equação (11):

$$e_r = \frac{P_r}{P_e} = \frac{R_r}{R_r + R_p} \quad (11)$$

Onde, R_r é a resistência de radiação e R_p a resistência de perdas.

Apesar de ser um parâmetro muito importante para antenas a e_r , por si só, não permite o cálculo da perda na transferência de potência entre o gerador e a antena, pois como mencionado na seção 3.1.1 (perda de retorno e casamento de impedância), existe uma parte da energia que é refletida da antena em direção ao gerador devido o descasamento de impedância. Além disso, a reflexão também pode ocorrer por descontinuidades no gerador/linhas de transmissão e antena [16].

O fator de qualidade, ou fator-Q, é uma medida de seletividade. Em antenas ideais apenas as frequências de interesse seriam dadas como resposta, com rejeição as demais. Na prática isso não ocorre, gerando respostas menos agudas. Isso é consequência de resistências parasitas no circuito. O Fator-Q é dado pela equação (12):

$$Q = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (12)$$

Onde, R é a resistência, C a capacitância e L a indutância, associados ao circuito.

Para antenas eletricamente curtas, as perdas ôhmicas são algo crítico, tornando o elemento radiante pouco eficiente. Uma antena curta, menor que λ , reduz muito sua eficiência e ganho. Um fator-Q alto diminui a largura de banda de uma antena. Em aplicações onde antenas curtas são necessárias, como comunicações móveis, p.e., uma antena de comprimento elétrico reduzido, com eficiência de 30 a 50%, pode ser

utilizada [15]. A propósito das comunicações móveis, um parâmetro importante nessa área é a polarização, discutida no tópico a seguir.

3.1.5 Polarização

Uma onda eletromagnética é formada por dois campos, um elétrico e outro magnético, separados ortogonalmente. Os campos se propagam em uma velocidade de propagação a qual o vetor é também distante 90 graus dos vetores campo elétrico e campo magnético. A propagação se dá em qualquer meio dielétrico, sendo que no vácuo sua velocidade é a da luz. Polarização é definida como a direção onde se localiza a componente elétrica de uma onda eletromagnética. Existem diversos tipos de polarização, sendo as mais comuns linear (horizontal e vertical) e circular. De acordo com Fusco [15]:

Uma onda polarizada de forma linear é uma onda eletromagnética transversal cujo vetor campo elétrico está posicionado ao longo de uma linha reta durante todo o tempo, enquanto que uma onda com polarização circular é uma onda eletromagnética transversal cujo vetor campo elétrico descreve um círculo ao longo do tempo. Uma onda polarizada de forma linear pode ter a sua polarização denominada vertical ou horizontal se estiver alinhada de forma paralela com o eixo vertical ou horizontal, respectivamente. (FUSCO, 2006, p. 129).

Uma vantagem da polarização circular é a flexibilidade de posicionamento da antena receptora [17], já que, quando utilizada polarização linear as duas antenas devem ser posicionadas de forma semelhante. Outra vantagem da polarização circular é que ela evita os danos sofridos pela rotação do plano de polarização pelo efeito Faraday, para ondas que viajam na atmosfera e ionosfera [18].

Na Figura 3.1.4 é apresentada uma antena dipolo posicionada verticalmente. A antena hipotética tem polarização linear vertical, pois seu posicionamento coloca o vetor E (campo elétrico) em disposição vertical; o vetor B (campo magnético) está ortogonal ao vetor E. Na imagem é mostrado ainda o vetor V, indicando direção e sentido da velocidade de propagação, a 90° dos vetores E e B.

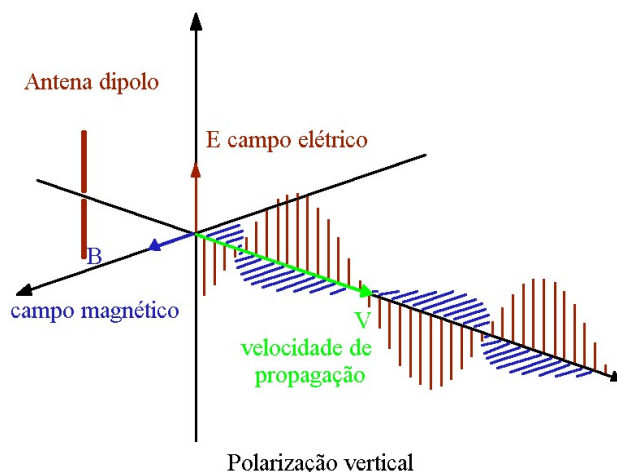


Figura 3.1.4: Dipolo hipotético com polarização linear vertical. Fonte: Autoria própria, adaptado de [18].

Para obter polarização circular, são necessárias duas ondas polarizadas de forma linear, com mesma amplitude, porém defasadas em 90° , uma horizontal e outra vertical. Essa combinação resulta em uma polarização circular cujo sentido pode ser à direita (RHCP ou *Right-Hand Circular Polarization*) ou à esquerda (LHCP ou *Left-Hand circular polarization*). Observando a onda saindo de um plano imaginário (ao atravessá-lo e não a partir da fonte), a polarização será RHCP, se o vetor campo elétrico girar no sentido anti-horário como se uma mão direita segurasse o eixo de propagação com o polegar indicando a direção de propagação e os demais dedos apontando o sentido. O inverso ocorre para a LHCP, o vetor campo elétrico gira no sentido horário, como se uma mão esquerda segurasse o eixo de propagação com o polegar indicando a direção de propagação e os demais dedos apontando o sentido. Na polarização circular a onda, quando refletida, muda o sentido, por isso numa antena com refletores a energia que é lançada para trás é refletida e somada construtivamente.

Para se obter polarização circular existem algumas técnicas [18]: (i) as antenas combinadas estão no mesmo plano porém com desfasamento elétrico de 90° ; (ii) as antenas combinadas são alimentadas em fase porém estão distantes longitudinalmente em $\frac{1}{4}$ de λ ; (iii) combinando (i) e (ii) para obter o deslocamento necessário de 90° , de modo que as antenas combinadas estejam distantes longitudinalmente em $\frac{1}{8}$ de λ (o que corresponde a 45° elétricos) e o deslocamento de fase seja também de 45° , o que pode ser obtido utilizando $\frac{1}{8}$ de λ na alimentação para o retardo da fase. Todos os métodos citados têm vantagens e desvantagens; o método (i), por exemplo, permite que se alterne entre RHCP/LHCP apenas invertendo a polaridade da alimentação de uma das antenas.

Ao longo deste subcapítulo foram apresentados diversos parâmetros importantes de antenas; para encerrá-lo vejamos a seguir alguns tipos comuns desses dispositivos.

3.1.6 Tipos comuns de antenas

A seguir, são descritos alguns tipos comuns de antenas:

- Dipolo de meia onda: formada por dois condutores medindo meio comprimento de onda;
- Dipolo dobrado: semelhante a dipolo de meia onda, porém com as terminações externas ligadas;
- Helicoidal: possui um refletor com até 80% do comprimento de onda, as espiras devem ter $\frac{1}{3}\lambda$ de diâmetro e o espaçamento de ser de $\frac{1}{4}\lambda$ [17];
- Yagi: Possui um refletor e vários diretores que determinam seu ganho, além dos elementos ativos;
- Antena de Microfita: tipicamente composta de um *patch* e um plano de terra metálicos, separados por um meio dielétrico. O próximo subcapítulo é referente a esse tipo de antena.

3.2 Antenas de Microfita

Antenas *patch* desenvolvidas em microfita são categorizadas em antenas planares. Tais dispositivos são comuns na faixa de micro-ondas, mas podem ser utilizados de 100 MHz até 50 GHz. São simples, possuem custo reduzido e são compatíveis com tecnologia de circuito impresso [19]. Suas utilizações mais comuns são em comunicações móveis, comunicações via satélite, radar, sistema de posicionamento global (GPS), etc.

De acordo com [3], a idealização da microfita foi atribuída a fontes diversas, entre elas Greig e Englemann (1952) [20] e Deschamps (1953) [21], esse último especificamente para antenas. Um grande número de publicações se deu apenas na década de 1970, época em que surgiu demanda por antenas de perfil baixo para a nova geração de mísseis. Uma das principais diferenças das antenas dessa categoria é que, comumente, existem apenas dois graus de liberdade para sua construção (plano XY) no que diz respeito ao *patch* e plano de terra.

Antenas de microfita são constituídas de um *patch* radiante separado de um plano de terra por uma camada dielétrica também conhecida por substrato dielétrico [2]. Na Figura 3.2.1 é apresentado um esquemático de uma antena de microfita típica.

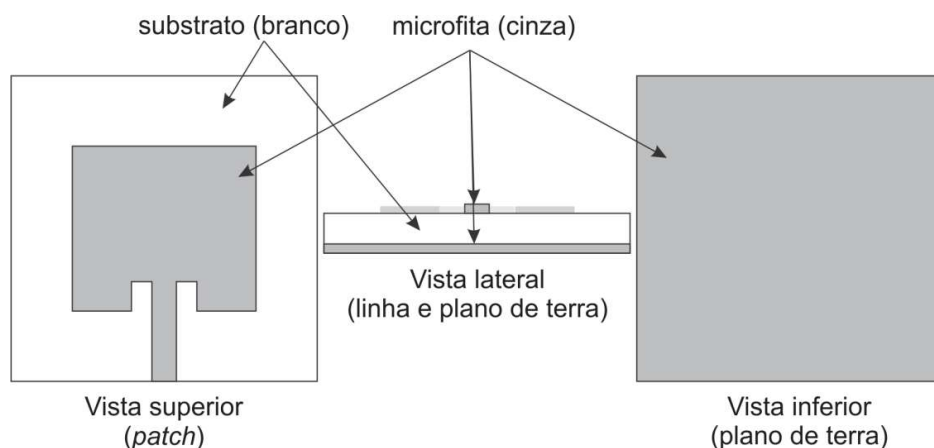


Figura 3.2.1: Esquemático de uma antena de microfita típica com *patch* retangular. Fonte: [14].

O *patch* radiante é uma camada metálica bem mais fina que o comprimento de onda no espaço livre (λ_0). O substrato dielétrico deve ter baixa perda [15] e pode ser feito de uma variedade de materiais com valores típicos de $2,2 \leq \epsilon_r \leq 12$. A distância h entre *patch* e plano de terra é, comumente, $0,003\lambda_0 \leq h \leq 0,05\lambda_0$ [2].

Existem diversas geometria para o *patch*, algumas obtidas analiticamente e outras apenas numericamente. A escolha da geometria vai depender dos parâmetros desejados no projeto. Geometrias comuns como a retangular são mais simples de modelar. Na Figura 3.2.2 são apresentadas algumas geometrias de *patch* comuns, mas existem diversas outras geometrias mais complexas, a exemplo das fractais.

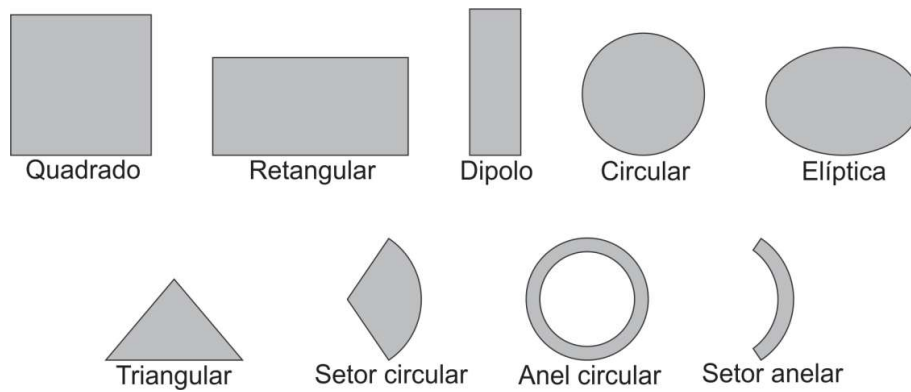


Figura 3.2.2: Geometrias típicas de *patches* para antenas de microfita. Fonte: [14].

As principais características das antenas de microfita incluem leveza, dimensões reduzidas, baixo custo, possibilidade de utilização em superfícies não planas e facilidade de construção, além de possuir versatilidade de frequência de ressonância, diagrama de radiação, impedância e polarização. Algumas de suas maiores deficiências são alto Q , baixa potência e eficiência reduzida, além de radiação espúria na alimentação e largura de banda de frequência muito modesta [2]. Contudo, existem muitas abordagens para diminuir tais efeitos negativos. Essas incluem, por exemplo, truncamento do plano de terra, aumento da espessura do substrato, utilização de substratos EBG, etc.

3.2.1 Fundamentos de radiação

Observando a Figura 3.2.3 é possível verificar que o *patch* se comporta como um circuito aberto; a corrente nas extremidades de L do *patch* é 0 (zero) e máxima no centro. O inverso ocorre para a tensão, cujo mínimo está no início de L o máximo no final. O VSWR resulta em 1 (um). A tensão e a corrente ficam fora de fase. Surge o efeito de campo de franjas nas extremidades, conforme Figura 3.2.3. Esses campos E (direção y^+) de franjas são somados em fase e geram a radiação da antena. A corrente também é somada em fase, porém anulada, já que no plano de terra existe uma corrente igual em direção oposta. Portanto, para antena de microfita a tensão é a responsável pela radiação [22].

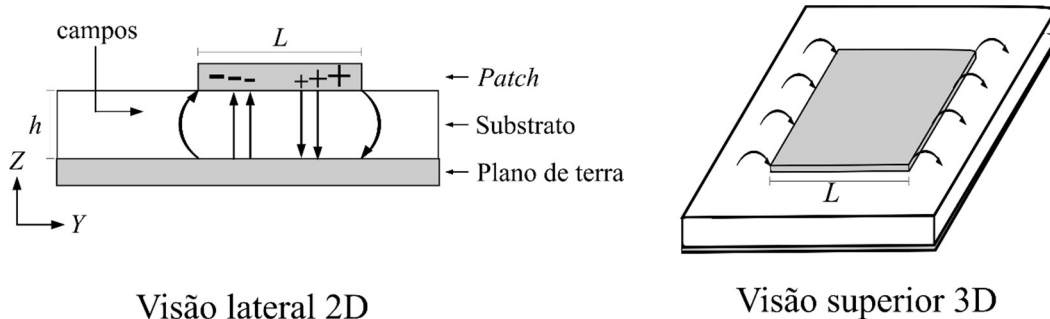


Figura 3.2.3: Efeito de campo de franjas e princípio de radiação. Fonte: Autoria própria.

A maioria das linhas de campo fica confinada no substrato dielétrico da antena, e outras passam pelo efeito do campo de franjas [23]. Parte das ondas se propaga no substrato e parte no ar, portanto há uma constante dielétrica efetiva ($1 < \epsilon_{eff} < \epsilon_r$, se o ar

é o outro meio acima da microfita) que considera a velocidade de propagação na microfita e o campo de franjas [2]. De fato, a microfita geralmente está em um meio de permissividade híbrida: substrato da antena e ar.

3.2.2 Patch retangular

Um *patch* muito comum, bastante utilizado em antenas de referência em pesquisas diversas é o *patch* retangular (ver Figura 3.2.3). Seu comprimento L controla a frequência e sua largura W , a impedância. Utilizar valores maiores para W pode incrementar a largura de banda, com prejuízo às dimensões da antena. As equações (13), (14) e (15), obtidas da referência [2], são utilizadas para obter W , L , e o ε_{eff} .

$$W = \frac{c}{2f_0 \sqrt{\frac{\varepsilon_r + 1}{2}}} \quad (13)$$

Onde c é a velocidade da luz no vácuo, f_0 é a frequência de interesse e ε_r a constante dielétrica do material.

$$L = \frac{c}{2f_0 \sqrt{\varepsilon_{eff}}} - 0.824h \left(\frac{(\varepsilon_{eff} + 0.3)(W/h + 0.264)}{(\varepsilon_{eff} - 0.258)(W/h + 0.8)} \right) \quad (14)$$

Onde ε_{eff} é constante dielétrica efetiva obtida da equação (15) e h é a espessura do substrato dielétrico.

$$\varepsilon_{eff} = \frac{\varepsilon_r + 1}{2} + \frac{\varepsilon_r - 1}{2} \left[\frac{1}{\sqrt{1 + 12 \frac{h}{W}}} \right] \quad (15)$$

3.2.3 Alimentação por linha de microfita

Nas estruturas propostas e apresentadas nesta tese são utilizadas alimentações por linha de microfita. Na Figura 3.2.4 é apresentado o esquemático de uma linha de alimentação de microfita típica. Esse tipo de estrutura é composta por uma fita metálica fina (microfita) separada do plano de terra por um material dielétrico.



Figura 3.2.4: Esquemático de uma linha de microfita hipotética. Fonte: [14].

A grande vantagem da microfita é a simplicidade do condutor poder ser impresso no mesmo plano em que a antena. Por ironia, essa é também a causa de uma

grande desvantagem: perda relativamente alta na linha de transmissão devido a alta densidade de corrente nas bordas da fita [3].

Apesar da radiação espúria, existe outra grande vantagem que motiva o uso das linhas de microfita, que é a possibilidade de fácil casamento de impedância através do ajuste do ponto de inserção y_0 e da largura da linha W_0 . Na Figura 3.2.5 é exposto o esquemático de um *inset feed* em uma antena *patch* retangular convencional.

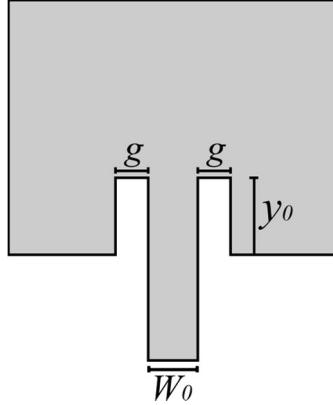


Figura 3.2.5: Esquemático de uma linha de microfita acoplada a uma antena *patch* retangular. Fonte: Autoria própria.

É possível projetar a largura de uma linha de microfita para uma impedância de interesse através das equações (16) e (17) a seguir, contidas nas referências [2], [13].

Se $\frac{W}{h} < 1$ (sendo h a espessura do substrato):

$$Z_0 = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} \ln \left(8 \left(\frac{h}{W} \right) + 0,25 \left(\frac{W}{h} \right) \right) \quad (16)$$

Onde,

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[\frac{1}{\sqrt{1 + 12 \left(\frac{h}{W} \right)}} + 0,04 \left(1 - \left(\frac{W}{h} \right) \right)^2 \right] \quad (17)$$

Se $\frac{W}{h} > 1$ (condição existente nas estruturas planares analisadas nesta tese):

$$Z_0 = \frac{120\pi}{\sqrt{\epsilon_{eff}} \left[\frac{W}{h} + 1,393 + \frac{2}{3} \ln \left(\frac{W}{h} + 1,444 \right) \right]} \quad (18)$$

Onde,

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \left[\frac{\epsilon_r - 1}{2 \sqrt{1 + 12 \left(\frac{h}{W} \right)}} \right] \quad (19)$$

Onde Z_0 a impedância característica da linha, ϵ_{eff} a permissividade relativa efetiva, W a largura da linha, h a espessura do substrato e ϵ_r a constante dielétrica relativa do material.

Para definir o ponto de inserção y_0 de um *inset feed* em uma antena *patch* retangular é possível utilizar a aproximação contida em [24], [25], dada pela equação (20):

$$\gamma_0 = 10^{-4} \{ 0,001699\epsilon_r^7 + 0,1376\epsilon_r^6 - 6,1783\epsilon_r^5 + 93,187\epsilon_r^4 - 682,69\epsilon_r^3 + 2561,9\epsilon_r^2 - 4043\epsilon_r + 6697 \} \frac{L}{2} \quad (20)$$

A largura das reentrâncias laterais (g) do *inset feed* das estruturas desta tese foram ajustadas numericamente. O estudo de Marin e Sayeed [26] propõe equações para aproximar a solução de g de forma analítica.

3.2.4 Antenas fractais

Para obter-se alguns parâmetros de interesse em antenas de microfita, como comportamento multibanda e compactação, muitas vezes é conveniente a utilização de *patches* de geometrias fractais ou quase-fractais. Em parte dos resultados abordados no capítulo 4, são apresentadas estruturas baseadas em fractais.

A palavra fractal foi introduzida em 1975 [5] por Benoit Mandelbrot. Ela é originada do latim e denota fragmentos quebrados e irregulares. Trata-se de uma categoria de formas complexas que possui auto-semelhança em sua geometria [27]. Em outras palavras, o formato inicial é repetido em escalas distintas, de modo que atributos da totalidade da forma estão presentes nas partes (ver exemplo na Figura 3.2.6). As pesquisas na área de fractais se baseiam em observações de padrões da natureza e sua utilização se dá nas mais diversas áreas.

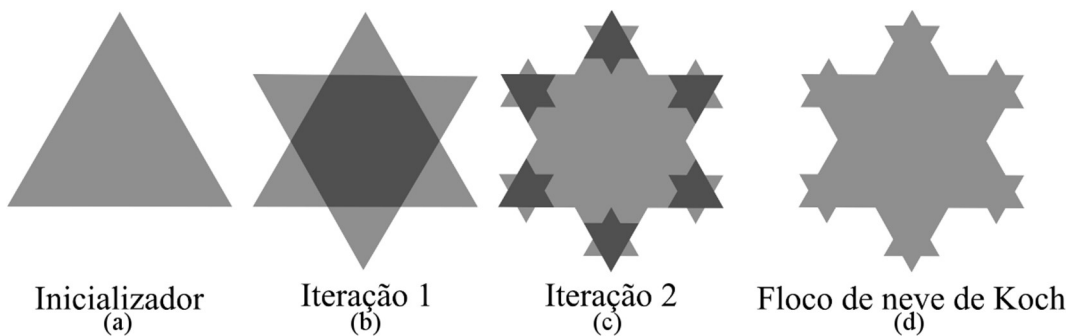


Figura 3.2.6: Exemplo de fractal (floco de neve de Koch): (a) Inicializador, (b) Iteração I, (c) Iteração 2, (d) Floco pronto. Fonte: Autoria própria.

O estudo do emprego de geometria fractal em projetos de antenas iniciou-se por volta de meados da década de 1980, com Nathan Cohen [28], sendo que os primeiros relatos de utilização dos fractais com essa finalidade remontam a década de 1990 [27].

Patches fractais podem ser utilizados para que a antena possa ser miniaturizada. Aumentando o número de iterações na geração de um *patch* fractal o espaço de

preenchimento poderá ser melhor aproveitado pelos detalhes da forma, aumentando assim o comprimento elétrico da antena sem aumentar suas dimensões gerais.

Patches fractais também podem ser utilizados para que a antena possa operar em duas ou mais bandas (antenas multibanda), já que, as diferentes escalas utilizadas nas iterações do *patch* fractal podem ser aproveitadas na geração de frequências de ressonâncias distintas.

Alguns trabalhos recentes com utilização de geometrias fractais aplicadas a antenas de microfita são apresentados a seguir.

3.2.4.1 Trabalhos Relacionados

Kuzu e Akcam [29] utilizaram o fractal Círculo de Apolônio e um plano de terra defeituoso (DGS - *Defected Ground Structure*) para obter uma nova antena multibanda para comunicações geoestacionárias por satélite.

Wei et al. [30] utilizaram um plano de terra defeituoso fractal (FDGS – *Fractal Defected Ground Structure*), com geometria fractal em Y para obter polarização cruzada em um antena de microfita.

Em [31] utilizou-se uma antena fractal produzida a partir de *slots* retangulares no *patch*. O objetivo dessa antena banda larga é coletar energia de micro-ondas dos sinais de comunicação móvel, redes locais sem fio, transmissão de TV, etc., de modo a possibilitar que essa energia possa tornar-se potência DC (*direct current*, corrente contínua) utilizável em microssistemas.

Em [32] é apresentada uma antena fractal *quadriband* para RFID (identificação de radiofrequência) e WiMAX. Em seu projeto são incorporados dois triângulos entrelaçados que formam um *slot* em forma de estrela no centro de uma antena monopolo em forma de triângulo. As bandas são determinadas pelos triângulos.

Uma antena fractal de Sierpinski impressa em impressora convencional de jato de tinta, com tinta à base de nano partículas de prata quimicamente sintetizadas é apresentada na referência [33]. O substrato utilizado é papel e a mesma opera nas bandas de 1,5-2,7 e 5,1-11 GHz. À propósito, são apresentados outros projetos de antenas impressas no subcapítulo 3.4 (Antenas Impressas).

O subcapítulo a seguir trata de um tema central abordado nesta tese, sobretudo no capítulo de resultados (Cap. 4).

3.3 Antenas EBG

As antenas de microfita são atrativas por várias características já citadas neste trabalho. Uma das maiores vantagens é a possibilidade de produção no mesmo plano dos circuitos transceptores [2]. Essa configuração é muito interessante em vários sistemas, no entanto, as ondas formadas a partir dos circuitos refratam e refletem no substrato, em decorrência do mesmo ter índices de refração distintos. Portanto, uma

fração da energia da antena fica presa e, não sendo radiada, produz correntes superficiais no plano de terra e uma estreita largura de banda [34].

Pesquisas e várias técnicas têm sido desenvolvidas para melhorar largura de banda e ganho em antenas de microfita, uma delas é a utilização de EBG (*Electromagnetic Band-Gap*), tecnologia capaz de suprimir a propagação de ondas em certos intervalos de frequência [35], chamados de bandas proibidas. Com a adição de furos de baixa permissividade, o isolamento do ambiente entre o *patch* e o plano de terra é alterado, dificultando que a reflexão e a refração das ondas geradas pelo circuito do transceptor criem campos entre esses dois elementos, o que produziria correntes superficiais, as quais desperdiçam energia de radiação, prejudicando parâmetros da antena, como eficiência de radiação e ganho.

A permeabilidade magnética (μ) e a constante dielétrica (ϵ) são parâmetros fundamentais na propagação das ondas na matéria. Um meio típico possui $\epsilon > 0$ e $\mu > 0$. Se adotado um valor negativo para algum desses parâmetros ocorreria o fenômeno *Electromagnetic Band Gap*, ou seja, o material não permitiria a propagação das ondas eletromagnéticas [36].

A tecnologia EBG consiste em arranjos (geralmente periódicos) em material condutor ou dielétrico. Tais arranjos propagam as ondas em uma frequência específica, para todos os estados de polarização e ângulos de incidência [37], semelhantemente a um semicondutor; em tais estruturas ocorrem *pass-band* e *stop-band*. Quando se trata de lacunas de ar no substrato de uma antena, tal estrutura possuirá um meio híbrido, com constante dielétrica maior que 1 (valor aproximado da constante dielétrica do ar) e menor que a constante dielétrica do material onde foram feitos os furos.

De acordo com a referência [3], substratos espessos de baixa permissividade promovem muitos benefícios especialmente quando combinados com lacunas de ar, reduzindo as ondas de superfície e evitando que se comprometa o padrão de radiação. Por outro lado, substratos finos de alta permissividade prejudicam o desempenho da antena. Um dos desafios da indústria é a produção de substratos de alto desempenho que viabilizem a produção de antenas de microfita de melhor qualidade. Outras vantagens da utilização de EBG são com relação ao aumento da largura de banda, redução das dimensões dos circuitos integrados, redução dos efeitos de borda e aumento de ganho e diretividade [38].

As estruturas inspiradas em arranjos EBG apresentadas nesta tese, no capítulo 4 (Estruturas Propostas e Resultados Experimentais), consistem em furos distribuídos de forma retangular e periódica nos substratos dielétricos. Na Figura 3.3.1 são apresentados tipos de geometrias de furos e geometrias de distribuição comuns (chamadas de geometria de malha). A geometria dos furos adotada nas pesquisas desta tese é a cilíndrica, com exceção das antenas impressas, através das quais foi desenvolvido um estudo quanto à influência de uma geometria não-convencional. Os furos possuem uma distância centro-a-centro chamada de *pitch* (a), a qual deve ser no

mínimo $a = 3r$ [38], onde r é o raio do furo. Geralmente o ar é utilizado como material de preenchimento dos furos, porém, nesta tese algumas simulações com outros materiais são apresentadas. Os furos nem sempre ultrapassam o substrato, nesta tese também é apresentado um estudo nesse aspecto.

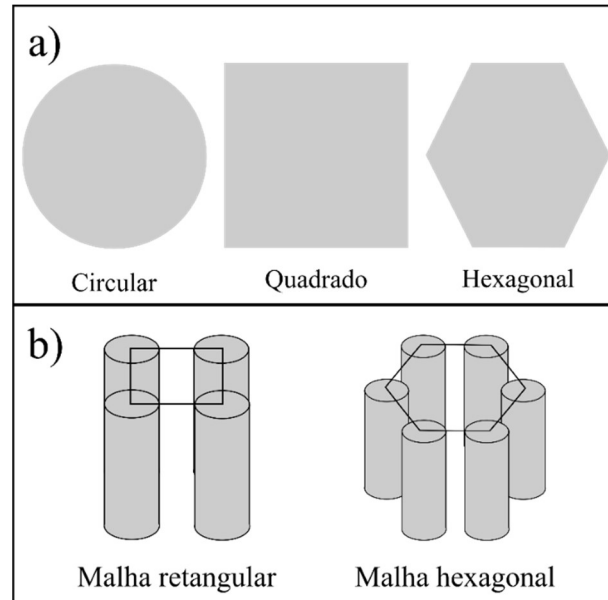


Figura 3.3.1: Exemplos de geometrias: (a) Geometrias de furos, (b) Geometrias de distribuição de furos.
Fonte: Autoria própria.

Alguns trabalhos recentes acerca da utilização de EBG em antenas de microfita são elencados na seção a seguir.

3.3.1 Trabalhos relacionados

Em [39] é proposto o uso de um algoritmo baseado em um sistema imune artificial em conjunto com o Método dos Elementos Finitos (FEM) para a otimização de EBGs completos compostos de telúrio e ar.

Em Hajlaoui e Trabelsi [37] é analisado o comportamento de múltiplas camadas EBG em uma antena *slot-patch* circular, a fim de se obter melhorias em parâmetros, principalmente ganho e largura de banda.

Em [40] foi produzida uma antena dielétrica biodegradável (DRA) impressa 3D com boa largura de banda. A introdução de *slots* (ranhuras) diminuiu o ϵ_{eff} , diminuindo assim o fator-Q e aumentando a largura de banda.

O breve estudo da referência [41] demonstra até que ponto aumentar o raio do furo também aumenta o ganho de duas antenas *patch*, uma com furos quadrados e outra com furos circulares, porém no plano de terra.

Um estudo em simulação acerca da profundidade dos furos é apresentado em [42] e revela que, quão mais profundos, maior é o deslocamento de frequência e maior é

o ganho. O deslocamento de frequência é natural e esperado, já que os furos diminuem a permissividade da estrutura, que por consequência eleva a frequência.

Em [43], antenas EBG produzidas em duas camadas dielétricas foram apresentadas, de modo que diferentes tipos de *patches* EBG foram utilizados para obter-se uma banda; em seguida mostrou-se como modificar os elementos EBG do *patch* com formas tipo *Mushroom*, *Cross Hair*, *Swastika* e Hexagonal para obter características de banda dupla.

Em [44] utilizou-se EBG para fazer um centro de fase linear de uma antena, obtendo ainda um melhor ganho e acoplamento mútuo, além do controle das correntes de superfície. Para tanto, o diâmetro dos orifícios EBG e o arranjo desses elementos foi investigado.

Em [45] o estudo de uma antena *patch* retangular com furos cilíndricos dispostos em malha hexagonal é apresentado. Diferentes configurações de furos foram utilizadas e obteve-se aumento de largura de banda.

Na referência [46] são apresentadas três configurações diferentes de malha (retangular, hexagonal e quase-periódica) no dielétrico de uma antena *patch* e sua influência na distribuição do campo elétrico no substrato.

Um estudo dos parâmetros de antenas de microfita EBG, para diversas configurações, é apresentado em [38].

Outras referências sobre a utilização de EBG em antenas de microfita são apresentadas no capítulo 4: Estruturas Propostas e Resultados Experimentais. No citado capítulo também é tratada a produção de antenas impressas com substratos inspirados em arranjos EBG, porquanto, as antenas impressas são abordadas a seguir.

3.4 Antenas Impressas

A impressão 3D (também chamada de 3DP - *3D Printing*) consiste em reproduzir um modelo projetado em computador. O projeto pode ser desenvolvido em um dos muitos softwares disponíveis para esse propósito. Numa impressão típica o projeto é reproduzido através da fundição do filamento do material e adição, camada a camada, até a impressão completa da peça projetada.

Em um dos trabalhos de pesquisa apresentados nos resultados desta tese foi utilizada impressão 3D com material ABS (*Acrylonitrile Butadiene Styrene*). No entanto, existem muitos materiais utilizados na impressão 3D, alguns deles são [47]: PLA (Poliácido Láctico), PET (Politereftalato de etileno), Nylon, Gesso e Resina. Entre outros matérias menos utilizados encontram-se [48]: titânio, aço, cerâmica, cera, areia e vidro.

Na impressão 3D, dois materiais são bem comuns, o PLA e o ABS. Ambos utilizam tecnologia FDM (*Fused Deposition Modeling* - Modelagem de Deposição Fundida).

O PLA é um dos materiais biodegradáveis mais importantes, tem propriedades atóxicas e é produzido a partir do ácido láctico, que é orgânico, de origem biológica e pode ser sintetizado por meio fermentativo, com açúcares derivados de cana de açúcar [49]. Já o ABS pode ser produzido a partir do petróleo. É muito comum na produção de protótipos e tem boa resistência mecânica.

Antigamente a tecnologia impressa era considerada de alto custo para a impressão de antenas, conforme visto em [3]. Hoje, no entanto, a 3DP se popularizou bastante, de modo que tanto os preços das impressoras são mais acessíveis como existem serviços de impressão fornecidos por terceiros, inclusive para pedidos *online*.

Os substratos dos protótipos 3DP desenvolvidos e apresentados nesta tese foram produzidos com material ABS da marca 3DFila, qualidade Premium, com uma impressora modelo VOID1+, marca VOID3D e qualidade de impressão na taxa de 0,05mm por altura de camada depositada. A empresa responsável pela terceirização do serviço foi a VOID3D [50], localizada no Instituto Metrópole Digital, Natal-RN.

Na Figura 3.3.2 é apresentado o modelo da impressora 3D utilizada, bem como dois refis de filamento ABS.

A impressão de antenas de microfita nem sempre se dá no substrato. Alguns trabalhos descrevem, por exemplo, a impressão de *patches* em impressoras convencionais, com tinta a base de nano partículas condutoras. Na seção a seguir são apresentados alguns trabalhos recentes sobre a utilização de impressoras 3D em antenas de microfita.

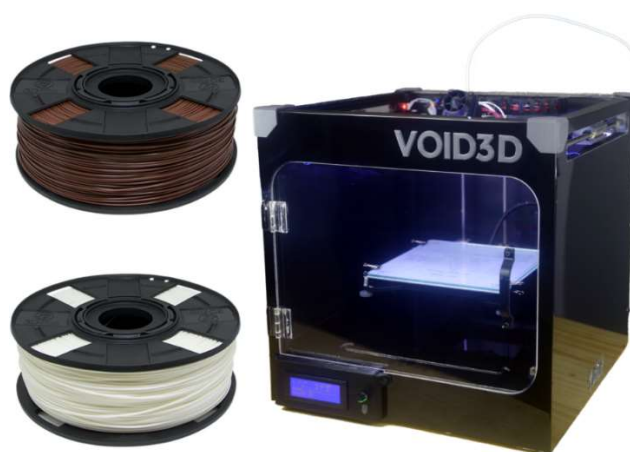


Figura 3.3.2: Dois refis de material ABS (esq.) e impressora Void1+ (dir.). Fonte: adaptado de [50].

3.4.1 Trabalhos relacionados

Alguns trabalhos, os quais apresentam características correlacionadas à pesquisa, são apresentados nesta seção.

Em Kumar e Dwari [40] foi proposta uma antena dielétrica ressoadora biodegradável impressa de banda larga. A ϵ_{eff} foi reduzida e consequentemente o fator-Q, devido à utilização de furos de ar em forma de ranhuras.

Biernacki et al. [51] variaram a quantidade de material impresso e ar contido no substrato 3DP por meio do controle do processo de impressão. Dessa forma alteraram a permissividade relativa. Uma maior qualidade na impressão resulta em mais material depositado e em maior ϵ_r do ABS.

Baines e Dahle [52] estudaram como aumentar a largura de banda de antenas *patch* de microfita com substrato 3DP, mas com os furos no interior do substrato e não ultrapassando-o ou parcialmente (em um dos lados), como ocorre nas antenas apresentadas nesta tese.

Jun e Sanz-Izquierdo [53] criaram uma antena *patch* CPW que se localiza sobre um outro substrato, sendo esse 3DP. Possui um plano de terra e um *patch* que apresentaram resultados parecidos quando produzidos com tinta condutiva de prata ou a partir de fita de cobre. A estrutura como um todo tem o objetivo de melhorar ganho e largura de banda, porém sua produção é complexa.

Outros trabalhos como o de Rizwan et al. [54], trazem aplicações que enfatizam a flexibilidade mecânica das antenas 3DP.

Outra linha de pesquisa analisada durante o doutorado do autor desta tese, e apresentada no capítulo de resultados (capítulo 4), diz respeito à utilização de uma RNA (Rede Neural Artificial) capaz de obter as perdas de retorno de uma antena inspirada em EBG de forma muito mais rápida que se utilizado um software de onda completa. A propósito, uma simulação numérica é muito onerosa em termos computacionais quando se trata de antenas com substrato EBG. Sendo assim, o subcapítulo a seguir introduz as Redes Neurais Artificiais (RNA).

3.5 Redes Neurais Artificiais

O cérebro humano, através da estrutura organizacional de seus neurônios, tem capacidade de processar alguns tipos de tarefas de forma muito mais rápida que os computadores digitais modernos. Trata-se de um sistema complexo, não linear e paralelo muito eficiente em reconhecimento de padrões, controle motor, entre outros. Esse entendimento de que o cérebro humano trabalha de forma diferente dos computadores convencionais é o fator que motiva os trabalhos acerca de Redes Neurais Artificiais, ou simplesmente Redes Neurais [55].

Segundo Silva et al. [56] os primeiros trabalhos sobre Redes Neurais Artificiais (RNA) datam da década de 1950, tendo maior ênfase a partir do início da década de 1990 e com forte potencial nos dias atuais em sistemas como: reconhecimento facial, previsões de mercado, avaliação de imagens oriundas de satélite, classificação de padrões de fala e/ou escrita, etc.

As RNA podem adquirir e manter o conhecimento baseado em informações. Elas são compostas por neurônios artificiais (unidades de processamento) interconectadas por ligações (sinapses artificiais). Suas áreas potenciais de aplicações incluem: aproximador universal de funções, controle de processos, reconhecimento/classificação de padrões, agrupamento de dados (clusterização), sistemas de previsão, otimização de sistemas e memórias associativas [56].

3.5.1 Neurônio artificial

O neurônio artificial é baseado no neurônio biológico, porém é um modelo simplificado. Observe a Figura 3.5.1. Os sinais de entrada, provenientes do meio externo, são valores de variáveis de uma determinada aplicação. Essas entradas são multiplicadas pelos pesos sinápticos, que as ponderam. As entradas ponderadas são somadas no combinador linear. O limiar de ativação, ou *bias*, determina o nível no qual o resultado do combinador linear gerará um valor de disparo à frente. A saída do combinador linear determina o potencial de ativação que segue para a função de ativação. Essa por sua vez restringe a saída do neurônio em valores determinados, por exemplo, 0 e 1, -1 e 1 [55], [56].

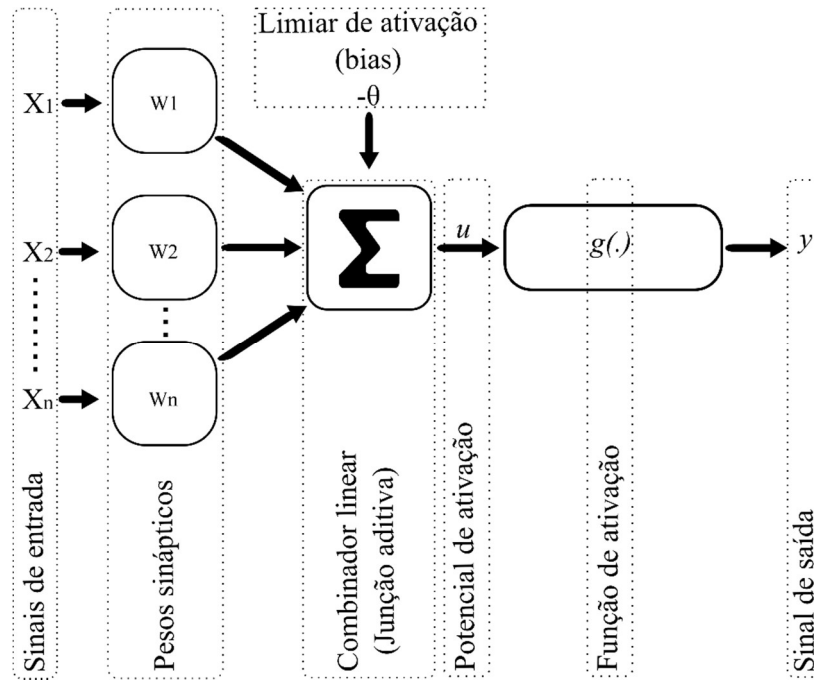


Figura 3.5.1: Neurônio artificial. Fonte: Autoria própria.

A representação matemática no potencial de ativação é dada pela equação (21):

$$u = \sum_{i=1}^n W_i \cdot X_i - \theta \quad (21)$$

Onde,

$$y = g(u) \quad (22)$$

Portanto, os pesos sinápticos são os responsáveis pelos resultados da rede. Eles armazenam o conhecimento, mas para isso a rede precisa ‘aprender’. O algoritmo de aprendizagem é um conjunto de passos nos quais os pesos sinápticos e limiar de uma RNA são ajustados.

3.5.2 Processos de treinamento

As RNA ‘aprendem’ a partir da apresentação de padrões, também chamados de amostras de treinamento. Na verdade, elas generalizam soluções após terem sido treinadas. Cada apresentação completa do conjunto de amostras à rede é chamada de Época de Treinamento. Tipicamente as amostras são divididas da seguinte forma: de treinamento (60% a 90%) e de testes (10% a 40%) [56]. As principais formas de aprendizado de uma RNA são por meio de:

- Treinamento supervisionado: à rede são apresentadas um conjunto de entradas e suas correspondentes saídas desejadas, de modo que, através desse processo iterativo (repetitivo), a rede possa ajustar seus pesos sinápticos e limiares;
- Treinamento não supervisionado: diferentemente do treinamento supervisionado, as saídas desejadas não são apresentadas. A rede encontra particularidades nas amostras e as separa em subconjuntos (ou *clusters*). Os pesos sinápticos e limiares são ajustados internamente de acordo com essas particularidades;
- Treinamento com reforço: é semelhante ao treinamento supervisionado, mas o ajuste dos pesos sinápticos e limiares decorrem da interação da rede com o meio ambiente que está sendo mapeado. A rede recebe respostas de satisfatório ou insatisfatório e, por tentativa e erro, ajusta os seus pesos sinápticos e limiares;
- Treinamento off-line (ou com lotes de padrões ou *batch*): o ajuste dos pesos sinápticos e limiares ocorre após a apresentação total das amostras de treinamento e considera os desvios entre as entradas de treinamento e suas saídas correspondentes;
- Treinamento online: utilizado em sistemas que variam rapidamente com o tempo, esse tipo de treinamento ajusta os pesos sinápticos e limiares após a apresentação de cada amostra.

3.5.3 Tipos de arquitetura de RNA

Três partes formam uma rede neural artificial, são elas: (i) camada de entrada: responsável por receber as informações do meio externo; (ii) camada escondida: composta por neurônios, ela extrai as características do sistema de interesse; (iii) camada de saída: também composta de neurônios, nela são produzidos e apresentados os resultados finais da rede, oriundos das camadas anteriores. As arquiteturas podem ser divididas em:

- *Feedforward* de camada simples: possui uma camada de entrada e uma camada de neurônios que é também a camada de saída. Fluxo unidirecional (*feedforward*)

- alimentação à frente, sem realimentação). Utilizada em classificações de padrões e filtragem. Exemplos de redes: Perceptron e Adaline. Treinamento: Hebb e Delta;
- *Feedforward* de múltiplas camadas: possui uma ou mais camadas escondidas de neurônios. Utilizada em aproximação de funções, classificação de padrões, robótica, controle de processos, etc. Exemplos de redes: Perceptron multicamadas e redes de base radial. Treinamento: regra delta generalizada e delta competitiva;
- Redes recorrentes (ou realimentadas): a saída dos neurônios são entradas para outros neurônios em redes de processamento dinâmico em sistemas que variam com o tempo. Exemplos de redes: Hopfield e Perceptron multicamadas com realimentação. Treinamento: regra delta generalizada e minimização de funções de energia;
- Redes reticuladas: a localização espacial dos neurônios é importante para a extração de características. Utilizada em *clustering*, reconhecimento de padrões, grafos, etc. Exemplo de rede: Kohonen com treinamento por processo competitivo.

3.5.4 Exemplo de aplicação de rede Perceptron com regra de Hebb

Esta seção tem por objetivo familiarizar o leitor por meio de um exemplo muito simples de RNA. Trata-se uma Perceptron de um único neurônio treinada pela regra de Hebb, contendo duas entradas e uma saída. Esse tipo de rede pode generalizar problemas linearmente separáveis. O objetivo da rede é gerar o resultado da tabela verdade do OU lógico (ver Tabela 3.5.1). Com a rede treinada, o usuário poderá entrar com duas proposições e a rede retornará se o resultado é V (verdadeiro) ou F (falso).

Na Tabela 3.5.1 é exposto que o resultado é FALSO (F), se e somente se, as duas proposições forem falsas, em outras palavras, o OU lógico (não exclusivo) determina que pelo menos uma proposição verdadeira seja suficiente para um resultado VERDADE (V).

Tabela 3.5.1 – Tabela verdade do OU Lógico ('OR').

Proposição 1	Proposição 2	Resultado
V	V	V
V	F	V
F	V	V
F	F	F

Fonte: Autoria própria.

Na Figura 3.5.2 é exposto o código fonte de treinamento da rede, desenvolvido no software de código aberto Scilab, que possui semelhanças ao software comercial Matlab. Na linha 4 do referido código, é descrita a matriz coluna 'amostras', na qual

cada linha corresponde a uma amostra de treinamento [limiar, proposição1, proposição 2], onde 1 e 0 representam V e F respectivamente. Dispor o limiar junto às entradas viabiliza o processamento via matrizes. Na linha 11 é apresentada outra matriz coluna de nome ‘saídas’, na qual cada linha corresponde à saída esperada para a respectiva amostra de treinamento, dada em ‘amostras’. Nessa matriz 1.000 e -1.000 (ao invés de 1 e 0) foram utilizados para representar V e F devido a convenção da função sinal utilizada). Na linha 18, o vetor ‘pesosLimiar’ [peso_do_limiar, peso1, peso2] é inicializado com valores aleatórios para peso do limiar, peso da primeira amostra e peso da segunda amostra. Essas amostras iniciais são apresentadas em seguida, conforme linha 19.

Nas linhas de 21 a 27 são criadas as variáveis: ‘eta’ (η - taxa de aprendizagem: determina a rapidez do treinamento. Um valor grande poderia acelerar o processo, mas haveria riscos de não convergir); ‘epocas’ (que conterà a quantidade de épocas de treinamento); ‘erro’ (o processo só finaliza quando não houver mais erro entre as amostra e saídas desejadas, logo ‘erro’ será falso, %F, ao final do processo); ‘i’ é a variável contadora utilizada para controlar o número de iterações; ‘u’ armazenará o potencial de ativação; ‘y’ armazenará a saída da função de ativação; O vetor ‘amostra’ conterà, em cada iteração, uma das amostras (uma linha) contidas em ‘amostras’.

Nas linhas de 29 a 54 são mostradas as iterações (*loops*) externos. Cada *loop* externo representará uma época de treinamento. Dentro dessa estrutura de repetição existe outra interna (linhas 31 a 51), cuja variável ‘i’ determina que haverá 4 *loops* (i=1 até i=4). Em cada um dos 4 *loops* o vetor ‘amostra’ guardará uma linha de ‘amostras’ (ver linha 32). Em seguida (ver linha 35), o vetor contendo os pesos e limiar é multiplicado pela inversa de ‘amostra’. Esse é o ponto onde todas as entradas da amostra atual são ponderadas pelos pesos e limiar e somadas, resultando em um escalar: o potencial de ativação ‘u’. Se esse potencial de ativação for maior ou igual a zero (ver linha 38) ‘y’ recebe 1, do contrário y = -1, ou seja, essa função sinal retorna dois valores distintos, o que cabe muito bem ao problema do OU lógico, cujos valores possíveis são verdadeiro e falso. Perceba que no primeiro *loop* interno (i= 1), a entrada utilizada foi a primeira, contida em ‘amostras’. Na linha 45 é averiguado se, para essa amostra, o resultado de ‘y’ não correspondeu a saída desejada, contida em ‘saídas’. Caso não tenha correspondido, ocorre o ajuste dos pesos e limiar (ver linha 46), ou seja, ‘amostra’ (nesse *loop* a primeira linha de ‘amostras’) é multiplicada pela diferença entre a saída desejada e a saída obtida, e multiplicada também pelo pequeno valor de ‘eta’, sendo ainda posteriormente somada com ‘pesosLimiar’, esse último tornando-se atualizado. Observe que, se em qualquer desses quatro *loops* internos (que apresenta as quatro amostras) a variável ‘erro’ for %T (*true* - verdade), linha 47, após o contador ‘epocas’ ser incrementado (linha 52), haverá outra apresentação completa das amostras (retornará a linha 29).

```

1 //Perceptron simples: treinamento via regra de Hebb. Problema linearmente separável
2
3 //Cada linha de 'amostras' é uma amostra de treinamento=> [limiar, entrada1, entrada2]
4 amostras=[
5 -1,1,1;
6 -1,1,0;
7 -1,0,1;
8 -1,0,0;];
9
10 //Cada linha de 'saidas' é a saída desejada para a respectiva amostra em 'amostras'
11 saidas=[
12 1.0000;
13 1.0000;
14 1.0000;
15 -1.0000];
16
17 //[limiar, peso1, peso2] iniciais e portanto aleatórios
18 pesosLimiar= [rand(0), rand(0), rand(0)];
19 printf('\nLimiar e pesos iniciais: %f %f %f', pesosLimiar);
20
21 eta= 0.001; //taxa de aprendizagem
22 epocas= 0; //contador de épocas de treinamento
23 erro= %T; //erro entre saída desejada e saída obtida
24 i=1; //contador iniciado em 1
25 u=1; //armazenará o potencial de ativação u
26 y=1; //armazenará a saída da função sinal y(u)
27 amostra= [0,0,0]; //armazenará a amostra momentânea (cada linha de 'amostras')
28
29 while erro == %T, //enquanto o erro existir faça
30     erro= %F;
31     while i<=4,
32         amostra= amostras(i, [1:2:3]);
33
34         //multiplicação de matrizes: (1x3) por (3x1). Resulta em um escalar
35         u= pesosLimiar*amostra;
36
37         //função sinal
38         if u>=0 then
39             y= 1.0000;
40         else
41             y=-1.0000;
42         end
43
44         //comparação da saída desejada versus saída da função sinal
45         if y<>saidas(i) then
46             pesosLimiar= pesosLimiar + eta*(saidas(i)-y)*amostra;
47             erro= %T;
48         end
49         i= i+1;
50     end;
51     epocas= epocas+1;
52     i=1;
53 end; //fim do enquanto (rede treinada)
54
55
56 printf('\nLimiar e pesos após treinamento: %f %f %f', pesosLimiar);
57 printf('\nÉpocas: %i', epocas);
58

```

Figura 3.5.2: Código-fonte (em Scilab) do treinamento da RNA para determinação do OU lógico. Fonte: Autoria própria.

Quando em uma dada época (*loop* externo) todas as saídas de ‘y’ (*loop* interno) corresponderem a suas respectivas saídas desejadas o programa promoverá um salto para a linha 56, onde são impressos o limiar e os pesos que permitirão que a rede possa funcionar corretamente, ou seja, o treinamento será concluído com sucesso. Nesse caso, a linha 57 mostrará quantas épocas foram necessárias para o treinamento. Vale informar, e é muito importante, que esse conjunto de limiar e pesos coerentes, provenientes do treinamento, não são os únicos valores possíveis. Com relação ao número de épocas, vai depender dos valores iniciais escolhidos aleatoriamente para os pesos e limiar e também da taxa de aprendizagem escolhida. Na Figura 3.5.3 é possível visualizar uma dada execução do programa apresentado. É visto os valores iniciais,

obtidos randomicamente e os valores finais, após o treinamento. A figura revela ainda que, nessa execução foram necessárias 54 apresentações de todas as amostras para que o treinamento fosse concluído, ou seja, para que não houvessem mais diferenças entre as saídas obtidas e as saídas desejadas em qualquer das amostras.

```
Limiar e pesos iniciais: 0.211325 0.756044 0.000221
Limiar e pesos após treinamento: 0.105325 0.756044 0.106221
Épocas: 54
--> |
```

Figura 3.5.3: Resultado do treinamento da RNA, 54 épocas para o ajuste dos pesos e limiar. Fonte: Autoria própria.

Os valores ajustados dos pesos e limiar apresentados na Figura 3.5.3 podem agora ser utilizados na rede Perceptron, conforme código-fonte da Figura 3.5.4, não sendo necessário nenhum outro treinamento. No código o usuário será requisitado (4 vezes) a inserir um par de proposições dadas no conjunto contendo 1 (verdade) e 0 (falso), conforme linhas 7 e 8. Essas proposições são colocadas no vetor 'entrada' (linha 10), juntamente com o valor -1, de limiar. A linha 12 contém o vetor 'pesos', que armazena os valores obtidos do treinamento (ver Figura 3.5.3), ou seja, valores de limiar e pesos. Na linha 13 o potencial de ativação 'u' é obtido. Em seguida (linhas 16 a 20) a função de ativação 'y' é definida, atribuindo V ao invés de 1 e F ao invés de -1, para um melhor entendimento pelo usuário da rede. Na linha 22 são mostrados, em cada um dos 4 *loops*, as duas proposições que o usuário deu como entrada e a saída 'y' gerada pela rede como resposta as proposições. Na Figura 3.5.5 é mostrada uma execução da rede para todas as possíveis entradas da tabela verdade (Tabela 3.5.1). É perceptível que todas as saídas foram coerentes.

```
1 //Rede Perceptron já treinada
2
3 i= 1 //contador
4
5 while i<=4, //realizará 4 iterações começando em i igual a 1
6
7     x1= input('Digite 1 ou 0: ')
8     x2= input('Digite 1 ou 0: ')
9
10    entrada= [-1, x1, x2] //-1 é o limiar da rede, x1 e x2 as entradas do usuário
11
12    pesos= [0.105325,0.756044,0.106221]; //obtidos do treinamento da rede
13    u= pesos*entrada; //potencial de ativação u
14
15    //função sinal
16    if u>=0 then
17        y= 'V'; //ao invés de 1
18    else
19        y= 'F'; //ao invés de -1
20    end
21
22    printf('%i OR %i = %s',x1,x2, y)
23
24    i= i+1 //incremento do contador
25 end; //fim das iterações e do programa
```

Figura 3.5.4: Código-fonte (em Scilab) da RNA Perceptron para determinação do OU lógico. Fonte: Autoria própria.

1	0	1
1	0	0
1	0	V
0	1	0
0	1	1
0	1	V
1	1	1
1	1	1
1	1	V
0	0	0
0	0	0
0	0	F

Figura 3.5.5: Resultado da RNA para todos os casos possíveis do OU lógico ('OR'). Fonte: Autoria própria.

Até aqui foi dada uma introdução sobre as RNAs, abordando o conceito de neurônio, processos de treinamento, tipos de arquitetura e um exemplo muito simples de RNA que pode ser aplicada a problemas linearmente separáveis. Uma abordagem aprofundada pode ser encontrada nos livros citados. Para encerrar o capítulo, a próxima seção apresentará ao leitor alguns artigos sobre a utilização de RNA aplicadas a antenas de microfita.

3.5.5 Trabalhos relacionados

Aliakbari et al. [57] mostrou como uma rede neural artificial permite obter as dimensões físicas de uma antena banda dupla, com polarização circular, de ondas milimétricas, para sistemas MIMO (*Multiple-input Multiple-output* - múltiplas entradas e múltiplas saídas) com demanda em sistemas 5G. Tal rede pode dispensar as simulações eletromagnéticas e reduzir o tempo de projeto.

Em [58], parâmetros de largura (W), comprimento (L), permissividade (ϵ_r) e espessura (h) do substrato de uma antena *patch* retangular foram utilizados para obter, via RNA, a otimização de ΔL , o qual permitiu calcular a frequência de ressonância da antena. No artigo de Singhal e Saini [59] é apresentado um levantamento de vários projetos de antenas de microfita utilizando redes neurais artificiais a fim de evitar representações computacionais exaustivas, acelerando assim a otimização de diversos parâmetros.

Neste capítulo foi apresentado o referencial teórico, composto dos subcapítulos: 3.1 Antenas, 3.2 Antenas de Microfita, 3.3 Antenas EBG, 3.4 Antenas Impressas e 3.5 Redes Neurais Artificiais. O objetivo deste capítulo foi familiarizar ou introduzir o leitor com assuntos que estão presentes na parte principal desta tese, o próximo capítulo, de número 4, intitulado Estruturas Propostas e Resultados Experimentais.

Capítulo 4

Estruturas Propostas e Resultados Experimentais

Neste capítulo são apresentados estudos de estruturas inspiradas em arranjos EBG simuladas, construídas e aferidas. Cada subcapítulo retrata uma das linhas de pesquisa produzidas durante o doutorado; algumas delas publicadas em conferências (nacional e internacional) e periódico. São detalhados tópicos importantes como: composição das estruturas, tipo de geometria, funcionamento, alimentação, plano de terra, etc. Além disso, os principais parâmetros são analisados: perda de retorno, casamento de impedância, diagramas de radiação, largura de banda, entre outros. Ao final o leitor compreenderá os principais avanços alcançados com a pesquisa.

4.1 Projeto de Antenas Patch em Microfita Utilizando Estruturas Inspiradas em EBG Otimizadas por Rede Neural Artificial

Este subcapítulo corresponde a uma das linhas de pesquisa investigadas durante o doutorado do autor. Nele são apresentadas otimizações, via Redes Neurais Artificiais, para uma antena com substrato inspirado em EBG. Trata-se de uma solução pontual, para um problema bastante específico, que pode servir de ensejo para inspirar aplicações semelhantes em novas pesquisas.

4.1.1 Introdução

Antenas EBG possuem características atrativas de radiação, como maior largura de banda e ganho. No entanto, esse tipo de estrutura tem complicações de construção, pois os orifícios EBG que atravessam completamente o substrato podem dificultar ou inviabilizar a produção e posterior fixação de *patches* ou planos de terra com geometrias complexas ou de linhas finas. Assim, uma perfuração que não ultrapassasse o substrato é interessante do ponto de vista da engenharia, pois o lado mais complexo da antena (*patch* ou plano de terra) poderia ser feito antes mesmo da confecção dos furos. Neste subcapítulo, é apresentada uma antena *dual-band* quase-fractal com geometria de *patch* baseada em cruz e seu estudo para substratos inspirados em EBG com diferentes profundidades de perfuração (altura dos furos no eixo Z). Adicionalmente, uma rede neural artificial foi desenvolvida e treinada pelo método Levenberg-Marquardt, comportando-se de forma excelente para a generalização das perdas de retorno quando dadas como entrada a frequência e a profundidade dos furos EBG, de modo que seu uso promoveu resultados precisos.

Comumente, os métodos numéricos como o Método dos Elementos Finitos imbuído em alguns softwares comerciais, costumam exigir demasiado tempo para a análise de uma antena EBG, sobretudo se a mesma for de *patch* complexo e tiver muitos

furos. Sendo assim, a utilização de um RNA (Rede Neural Artificial) pode ser uma boa alternativa para generalizar os principais parâmetros de uma antena de um tipo particular, permitindo que a simulação por método numérico seja feita somente após o alcance de resultados desejados para um parâmetro de maior interesse do pesquisador.

Tanto a antena, quanto a técnica de perfuração parcial do substrato EBG, bem como a técnica de generalização via Redes Neurais Artificiais, são apresentadas no decorrer deste subcapítulo. É visto o comportamento da antena citada quando utilizada uma malha retangular de furos inspirada em EBG, com diferentes profundidades de furos, e como uma leve perfuração em 25% da espessura do substrato apresentou resultados bem satisfatórios, além de como a RNA reduziu o tempo de processamento em relação aos convencionais métodos numéricos.

A maioria dos trabalhos estudados, relacionados a antenas de microfita EBG abordam:

- Raio dos furos: que altera a largura de banda das frequências mais altas [60] [45];
- Pitch (ou período da rede ou distância centro-a-centro entre os furos): que altera as frequências mais baixas [38] e, segundo a referência [61], está intimamente relacionado ao ganho e diretividade da antena;
- Geometria dos furos: que trata, por exemplo, de furos com geometrias cilíndrica e quadrática [62] [63];
- Geometria da malha (disposição dos furos): que trata de furos dispostos em diferentes formas, a exemplo de hexagonal, quase periódica e retangular. A propósito, com a geometria retangular são proporcionados resultados bem satisfatórios, sobretudo no tocante a perda de retorno [46].

Portanto, constata-se que existe vasta quantidade de linhas de pesquisa na área de antenas EBG. Ainda assim, a maioria dos estudos sobre antenas EBG ou não consideram furos no substrato dielétrico ou consideram furos com perfuração do substrato em 100%, ou seja, com os furos ultrapassando completamente o mesmo. Uma quantidade mais reduzida de trabalhos acerca da profundidade (ou altura h) e localização dos furos no eixo Z (considerando Z o eixo da espessura do substrato) são encontrados na literatura. Alguns trabalhos nessa perspectiva são vistos nas referências [64], [42], [38]. Sendo assim, a pesquisa aqui apresentada contribui também para o enriquecimento na literatura nessa área de pesquisa.

4.1.2 Antena inspirada em EBG quase-fractal proposta

Na Figura 4.1.1 são apresentadas as duas iterações da geometria quase-fractal utilizada, além da aparência da antena. A inclusão de cruzes vazadas no centro de quadrados de cobre gera frequências cada vez menores [65] já que, quanto menores os quadrados gerados por essas inserções, menores são seus comprimentos de onda e

maiores são suas frequências, conforme $\lambda = c/f$. O *patch* quadrado da antena tem seu lado medindo 44,54 mm. A Figura 4.1.1 também apresentada o comprimento L e largura W para a cruz maior e seus respectivos L' e W' para as cruzes menores, empregadas na antena em sua segunda iteração.

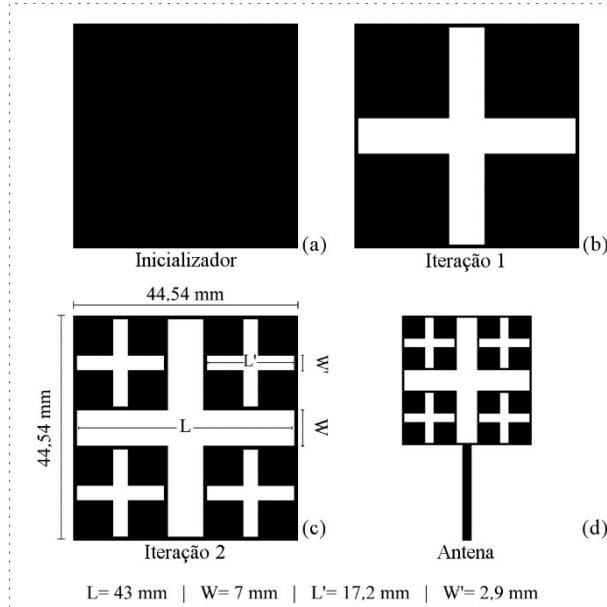


Figura 4.1.1: (a) Inicializador, (b) Iteração 1, (c) Iteração 2, (d) Aparência da antena. Fonte: Autoria própria – geometria apresentada inicialmente por [65].

Neste estudo optou-se pela geometria cilíndrica para os furos, em razão da facilidade na perfuração dos artefatos. No tocante a geometria da malha (disposição dos furos no substrato), foi escolhido o modelo retangular utilizado em artigos como [46], por ser a topologia mais utilizada e por sua simplicidade de implementação, além de promover baixas perdas de retorno. O substrato utilizado foi o FR-4 com $\epsilon_r = 4,4$ e espessura de 1,57 mm, por ser um material de fácil acesso e comumente utilizado em antenas de microfita. Os efeitos da utilização de substratos EBG não são muito sentidos em substratos delgados [64]. No tocante ao raio dos furos, para este estudo foi fixado em 1,5 mm, enquanto o *pitch a* (distanciamento centro-a-centro dos furos) foi de 5 mm, concordando com o distanciamento mínimo dado por $a = 3r$ [38], onde r é o raio do furo. O trabalho da referência [45] traz um estudo do comportamento de uma antena de microfita EBG quando alterado o diâmetro dos furos.

Na Figura 4.1.2 é exposto o esquemático da antena proposta aqui, com os furos. A Figura 4.1.2 também revela a altura do plano de terra na face oposta ao *patch*: mede 12,8 mm a partir da base do *patch*. Essa altura foi obtida numericamente ainda para a antena sem os furos [14]. Esse tipo de técnica ajusta um melhor casamento de impedância em faixa larga [66]. É importante frisar que o plano de terra e o *patch* não possuem furos. Não foram notadas grandes diferenças quanto ao lado em que os furos são feitos, quando esses não atingem 100% da profundidade do substrato, ou seja, do lado do *patch* ou lado do plano de terra. Neste projeto a linha de alimentação tem largura de 3,19 mm, tendo sido calculada de acordo com as equações (18) e (19) do referencial contido nesta tese.

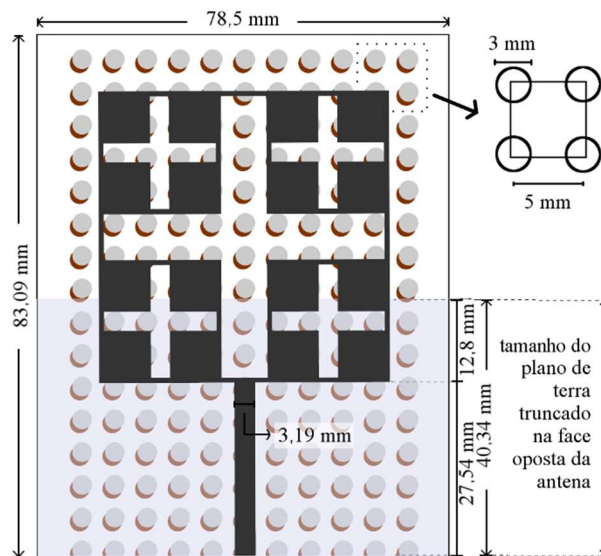


Figura 4.1.2: Esquemático da antena inspirada em EBG proposta. Fonte: Autoria própria.

4.1.3 Modelo neural proposto

A RNA utilizada no projeto das antenas foi treinada com uma grande quantidade de dados simulados via software comercial HFSS, o que permitiu que a rede se comportasse de maneira semelhante ao software de onda completa, porém com maior eficiência de tempo. A rede proposta é multicamadas e foi treinada em *backpropagation*, na metodologia Levenberg-Marquardt (LM). A mesma apresentou aprendizado e convergência rápidos.

Na Figura 4.1.3 é apresentado o esquemático da RNA utilizada. A rede possui: duas entradas (frequência e profundidade dos furos no substrato), duas camadas ocultas com 5 neurônios cada e uma camada de saída composta de 1 neurônio, cuja saída é a perda de retorno. Para o treinamento, um conjunto de 432 pares de entradas (profundidade do furo, frequência) foi apresentado juntamente com seu conjunto de 432 saídas esperadas. Em seguida, durante a fase de testes preliminares, foi utilizado mais um conjunto de 108 pares. Por fim, a rede conseguiu, após o treinamento, descobrir uma saída (perda de retorno), via generalização, para qualquer conjunto de novas entradas. Para este estudo, apenas a profundidade dos furos foi variada, de modo que, as dimensões de raio, *pitch*, *patch*, substrato e plano de terra foram as mesmas para todos os protótipos.

Simular antenas EBG em software de onda completa é muito oneroso em termos de tempo de processamento. O gráfico de frequência *versus* perda de retorno é o ponto de partida para várias pesquisas sobre antenas; com sua rápida obtenção foi possível usar o software de onda completa somente quando resultados consistentes foram obtidos da rede, reduzindo assim, em horas, o tempo total despendido com simulações. Isso é uma das contribuições desta pesquisa.

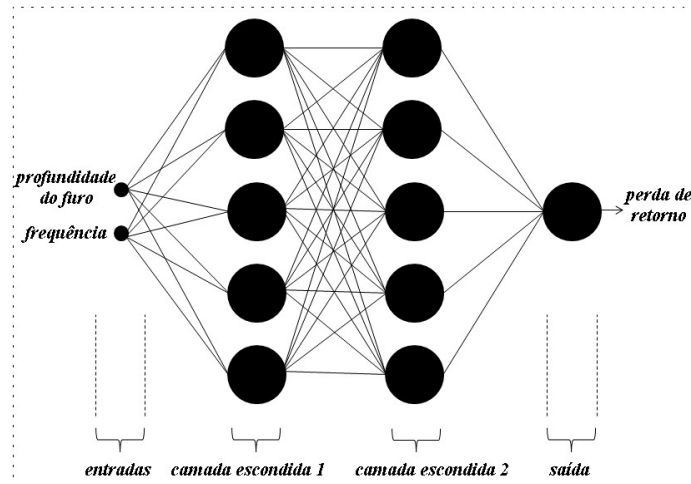


Figura 4.1.3: Modelo RNA proposto. Fonte: Autoria própria.

4.1.4 Resultados de projeto

Um comparativo entre a antena *dual-band* de referência [14] e a antena inspirada em EBG proposta é mostrado a seguir. Em seguida, para a antena proposta, são contrapostos os dados de resposta da RNA com os dados de simulação computacional (oriundos dos métodos numéricos imbuídos no software comercial HFSS). É visto que o modelo neural treinado pelo método *backpropagation* associado à Levenberg-Marquardt possibilita a obtenção de resultados positivos.

4.1.4.1 Antena de referência *versus* antena inspirada em EBG

Inicialmente comparou-se a antena de referência (sem os furos) com antenas simuladas com perfuração em 25%, 50% e 100% da espessura do substrato, o que denota furos com profundidades milimétricas respectivas de 0,3925, 0,785 e 1,57. Na Figura 4.1.4 é apresentado um esquemático das perfurações (visão lateral) no substrato inspirado em EBG. Os dados da Tabela 4.1.1 demonstram que o deslocamento das bandas à direita aumenta com o aumento da profundidade dos furos; isso era esperado, já que a permissividade do substrato diminui com a inserção dos furos de ar. Também é visto que a perda de retorno aumentou com o aumento da profundidade dos furos, o que é ruim.

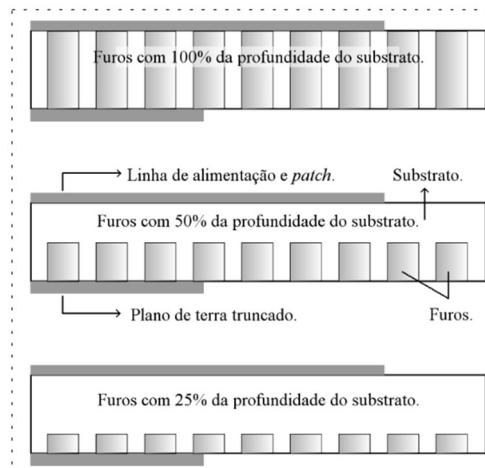


Figura 4.1.4: Esquemático (visão lateral) das perfurações no substrato EBG. Fonte: Autoria própria.

Tabela 4.1.1 Taxa de profundidade dos furos, frequência, S_{11} , largura de banda (BW) e magnitude da impedância de entrada da antena (Z).

Parâmetro	Sem EBG		EBG: 25%		EBG: 50%		EBG: 100%	
Freq. (GHz)	3,1	4,40	3,27	4,51	3,35	4,59	3,48	4,75
S_{11} (dB)	-22	-16	-19	-14	-18	-11	-15	-11
BW (MHz)	150	130	150	170	170	120	140	110
BW (%)	4,8	2,95	4,6	3,76	5,07	2,61	4,02	2,31
Z (Ω)	51	48	59	52	56	45	69	46

Fonte: Autoria própria.

Observando os resultados numéricos percebe-se um melhor equilíbrio para a antena ‘EBG: 25%’ em relação às demais antenas com profundidades de furos diferentes e também com relação à antena de referência, já que:

- Não desloca substancialmente as bandas em relação à antena de referência;
- Mantém os valores de S_{11} bem abaixo do limiar de -10 dB;
- Somente ela apresentou as duas bandas com pelo menos 150 MHz de largura;
- Somente ela apresentou largura de banda percentual acima de 3% nas duas bandas;
- Revelou casamento de impedância razoável nas duas bandas.

Na Figura 4.1.5 são expostos os gráficos das perdas de retorno simuladas para as antenas com furos cilíndricos em 25%, 50% e 100% da espessura do substrato.

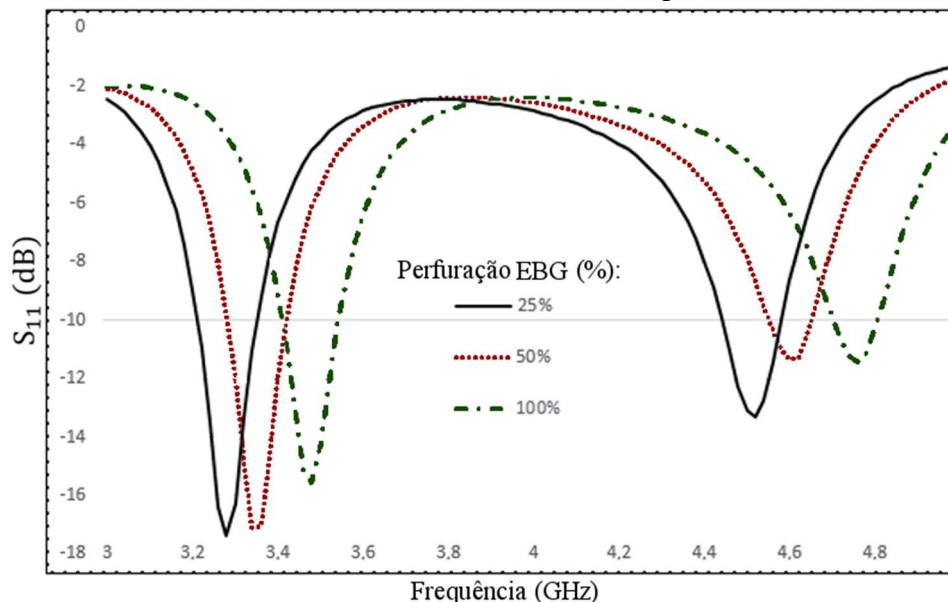


Figura 4.1.5: Perdas de retorno simuladas para perfurações em 25%, 50% e 100% da espessura do substrato. Fonte: Autoria própria.

Observando a Figura 4.1.6 percebe-se que as duas frequências da estrutura com perfuração em 25% estão próximas ao centro da Carta de Smith, denotando que o casamento de impedância da estrutura aproximou-se dos 50 Ω de interesse.

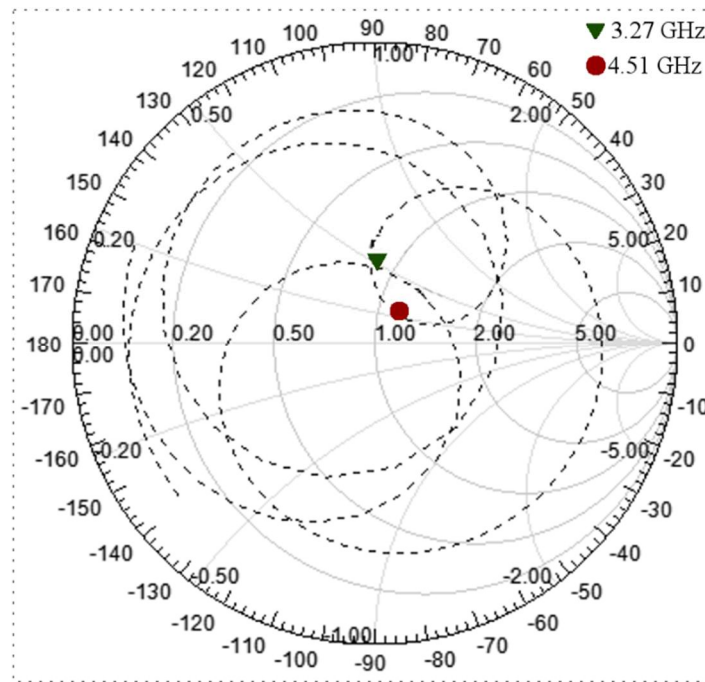


Figura 4.1.6: Carta de Smith simulada para a antena com furos cilíndricos em 25% da espessura do substrato para Freq1= 3,27 GHz e Freq2= 4,51 GHz. Fonte: Autoria própria.

4.1.4.2 Método numérico *versus* rede neural artificial

Na subseção acima foi demonstrado que perfurações EBG com profundidades menores que 100% (o convencional) da espessura h do substrato podem ser eficientes, não sendo necessário perfurar o substrato de um lado a outro. Outro aspecto relevante é quanto à síntese de antenas com *patches* e substratos complexos como a antena apresentada neste trabalho. Tal síntese exige elevado poder de processamento computacional e demasiado uso de memória, ocasionando mais tempo de trabalho. Portanto, nesta vertente da pesquisa foi utilizado um modelo de Rede Neural Artificial (RNA) que possibilita uma rápida e eficiente definição da perda de retorno se como entradas forem dadas a frequência de ressonância e a profundidade dos furos. A rede foi treinada com base no algoritmo *backpropagation* com metodologia de Levenberg-Marquardt, a qual é muito eficiente quando utilizada em redes que não possuem mais que algumas centenas de conexões [67].

Na Figura 4.1.7 são mostrados os gráficos de saída durante o treinamento da rede para 0%, 25%, 50% e 100%: os gráficos em linhas referem-se às entradas de treinamento e os gráficos em círculos são relativos à saída produzida pela RNA. Não foi utilizado treinamento para a profundidade em 75% (cujos gráficos também aparecem na Figura 4.1.7), de modo que o gráfico dos círculos foi generalizado pela rede e o gráfico da linha (oriundo do método numérico) foi utilizado apenas para checagem. A precisão da rede para o propósito da antena em questão é evidente, uma vez que os gráficos de entrada e saídas se sobrepõem.

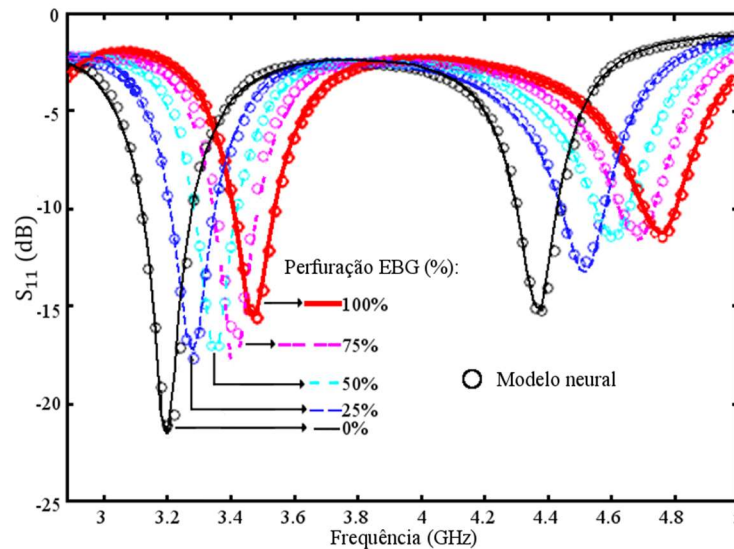


Figura 4.1.7: Gráficos de treinamento (linhas) *versus* gráficos de saída da RNA (círculos). Fonte: Autoria própria.

Os gráficos da Figura 4.1.8 apresentam o desempenho de treinamento da rede proposta em épocas por erro quadrático médio. O círculo verde destaca que a melhor performance ocorreu em 50 épocas. Por época entende-se o processo de apresentar, à rede em treinamento, todos os padrões de treinamento disponíveis, assim, cada apresentação de todos os padrões equivale a uma época de treinamento [56], [68]. O treinamento de uma RNA é descontinuado após uma determinada quantidade de épocas (50 neste caso), sendo a rede testada com dados de validação a fim de avaliar seu desempenho.

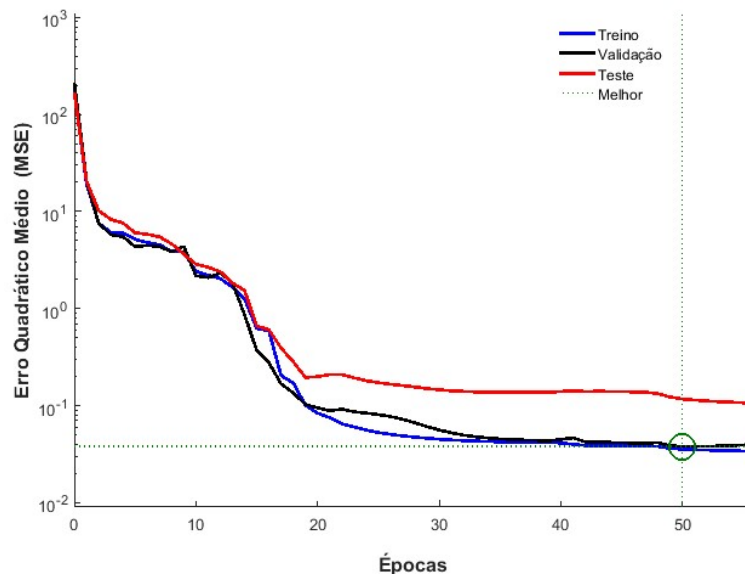


Figura 4.1.8: Performance da rede em épocas por erro médio quadrático. Fonte: Autoria própria.

Os gráficos da Figura 4.1.9 contêm os resultados da rede operando com entradas inéditas (não treinadas) de profundidades de furos: 20%, 40%, 60% e 80% com respeito à espessura do substrato (1,57 mm). Os gráficos das linhas são empregados para confrontação e são informações coerentes, resultantes de simulação via Método dos Elementos Finitos embutido no Software HFSS. Os gráficos das linhas são comparados

com os gráficos dos círculos (provenientes da RNA). Novamente é notório o rigor da rede para o propósito em questão, com a sobreposição dos gráficos.

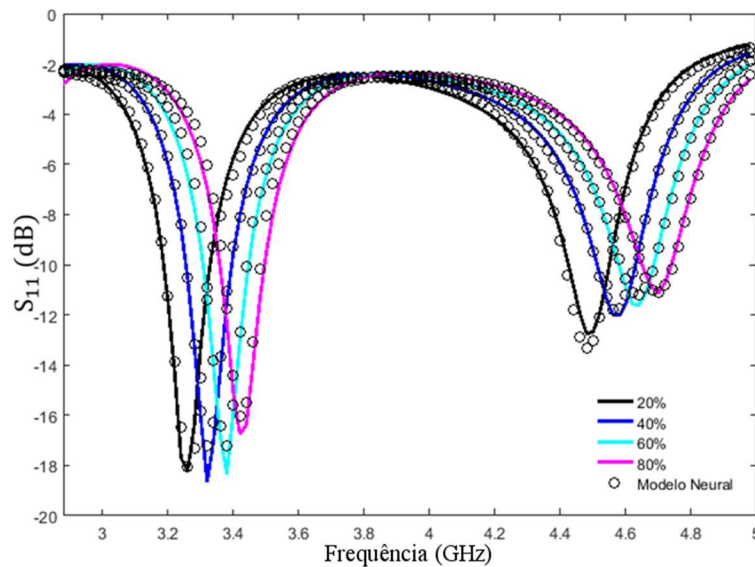


Figura 4.1.9: Saída da RNA para entradas inéditas (círculos) *versus* dados de comparação provenientes de método numérico (linhas). Fonte: Autoria própria.

É importante ressaltar que o treinamento ocorre uma vez tão somente, depois desse processo é possível generalizar qualquer resposta arbitrária, de forma que o usuário da rede entra com a frequência e altura do cilindro (profundidade do furo) e a rede, em tempo médio de 1,63 segundos, revela a perda de retorno correspondente.

A abordagem neural apresentada pode contribuir de modo que o usuário/pesquisador desse tipo de estrutura ou de estruturas semelhantes apenas utilize simulação numérica após um bom resultado da RNA, ganhando muito tempo, pois o tempo médio das simulações via HFSS foi de 10,39 minutos (ou 623,4 segundos) em um computador com elevado poder de processamento e memória, a saber: processador i7-5500U 2.40 GHz / 16 GB de RAM. Um comparativo de tempo médio entre as duas abordagens é mostrado na Figura 4.1.10.

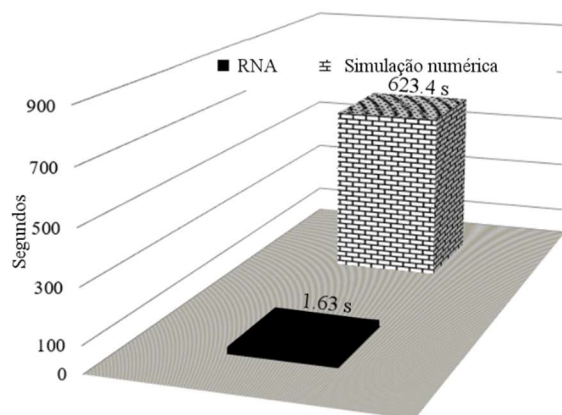


Figura 4.1.10: Tempo médio (segundos) para obtenção da perda de retorno *versus* frequência utilizando a RNA proposta e utilizando a simulação numérica via HFSS. Fonte: Autoria própria.

4.1.5 Resultados experimentais

Na Figura 4.1.11 são mostradas as perdas de retorno medidas dos protótipos construídos com furos inspirados em EBG em 80% da espessura do substrato e sem furos EBG (antena de referência). Esses resultados são comparados com as saídas da RNA (as quais coincidiram com as simulações) para as antenas com perfurações em 20% e 80%, que são respectivamente as menores e maiores perfurações parciais cujos gráficos foram apresentados. A técnica usada para realizar as perfurações parciais foi proposta em [69], a qual não garante um alto grau de precisão na profundidade e distanciamento centro-a-centro dos furos, o que pode ter acarretado pequenas divergências entre resultados simulados e medidos. Percebe-se na Figura 4.1.11, que ocorreu um deslocamento entre os resultados da antenna de referência (sem EBG) e da RNA para 20% de profundidade em relação à espessura do substrato. Isso ocorreu porque a presença de buracos de ar diminuiu a permissividade elétrica e, consequentemente, aumentou a frequência. Por outro lado, comparando o gráfico da perda de retorno da antenna inspirada em EBG construída (profundidade de 80%) com o gráfico gerado pela RNA (profundidade de 80%), percebe-se que houve uma boa concordância quanto à frequência de ressonância. Melhor largura de banda e perda de retorno foram obtidas na segunda banda da antenna inspirada em EBG construída.

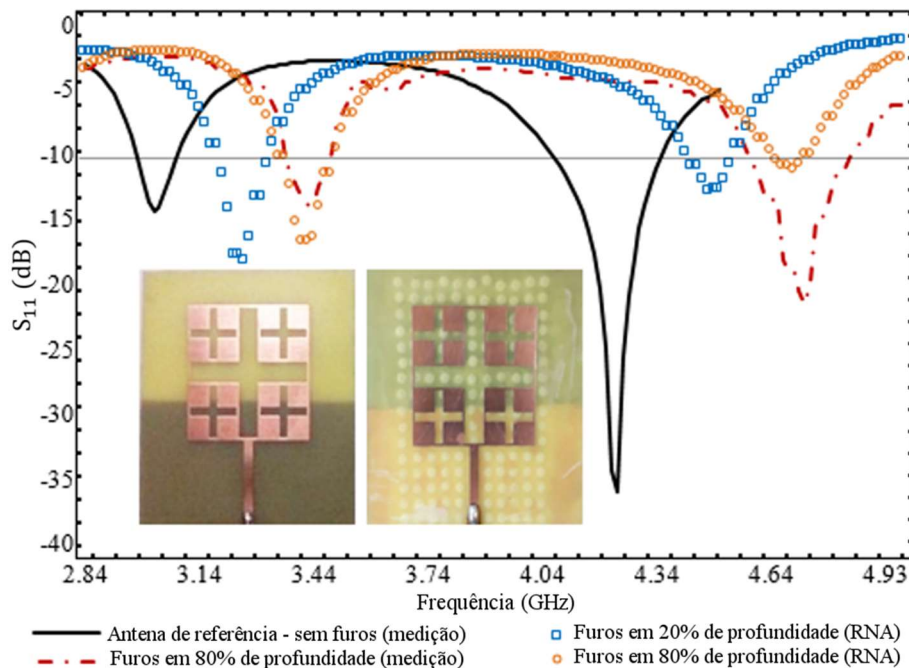


Figura 4.1.11: Perdas de retorno medidas das antenas sem furos e com furos em 80% e perdas de retorno obtidas via RNA das antenas com furos em 20% e 80% da espessura do substrato. Fonte: Autoria própria.

4.1.6 Melhorias obtidas

Com relação às perfurações parciais, a antenna com uma perfuração não convencional de 25% em relação à espessura do substrato promoveu resultados superiores à antenna sem furos EBG bem como com relação a perfurações mais profundas, de 50% e 100%. A mesma não causou deslocamento significativo das

frequências em relação à antena de referência (sem os furos), além disto, as perdas de retorno foram baixas e foi a única a promover duas bandas com 150 MHz ou mais de largura. Também foi obtido um bom casamento de impedância com essa configuração. Uma perfuração parcial permite que se construa uma antena perfurando apenas o lado menos complexo da estrutura, o que pode ser útil do ponto de vista da engenharia.

Com relação à rede proposta, a RNA treinada em *backpropagation* com metodologia de Levenberg-Marquardt possibilitou uma definição rápida e eficiente da perda de retorno, quando dadas como entradas a profundidade dos furos e as frequências de ressonâncias de interesse. A rede possibilita ao usuário/pesquisador obter as perdas de retorno dadas profundidades arbitrárias para os furos, reduzindo o total de tempo despendido com simulação numérica, o qual costuma ser muito oneroso nesse tipo de estrutura, mesmo quando em computadores de poder computacional diferenciado.

Com relação às antenas construídas observa-se que, a antena inspirada em EBG em 80% mostrou boa concordância de frequência central em relação aos resultados obtidos da RNA, mesmo tendo sido confeccionada sem o auxílio de uma prototipadora. As principais novidades e contribuições desta vertente da pesquisa são: projeto muito rápido e viabilização da construção de antenas EBG com *patches* complexos.

4.2 Técnicas de baixo custo para o desenvolvimento de antenas de microfita inspiradas em EBG

Durante as pesquisas com substratos EBG, algumas dificuldades foram encontradas com relação ao acesso a máquinas que perfurassem substratos convencionais, as chamadas prototipadoras. Em determinado momento procurou-se soluções nas quais fosse possível desenvolver as estruturas sem dispor de equipamentos e materiais de alto custo. Daí surgiram ideias que culminaram no artigo intitulado ‘Técnicas de Baixo Custo Para o Desenvolvimento de Antenas de Microfita com PBG’ [69] (apresentado no MOMAG 2018 - ver Figura 4.2.1).

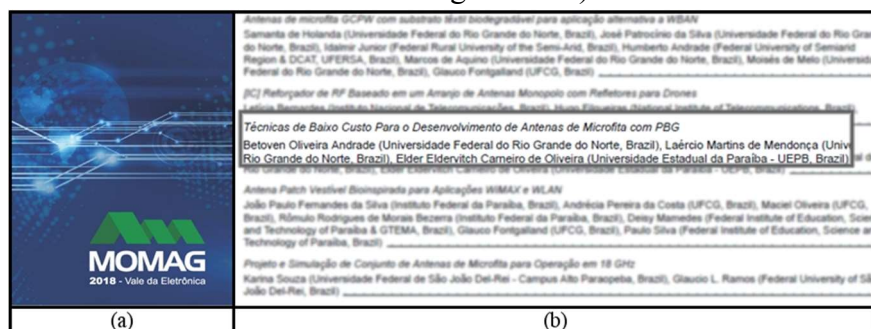


Figura 4.2.1: Anais do MOMAG 2018: (a) Capa, (b) Informações do artigo, autores e instituições. Fonte: Autoria própria.

4.2.1 Introdução

Neste trabalho já foram mencionadas as vantagens do uso de substratos EBG em antenas de microfita, no entanto, produzir pesquisa científica nessa área pode ser uma tarefa de custo financeiro relativamente elevado, em decorrência dos equipamentos

necessários. Aqui são apresentados materiais, técnicas de análise e construção, custos financeiros e recomendações que podem viabilizar a produção de antenas de microfita com substratos inspirados em EBG para fins de ensino, iniciação científica e pesquisas com restrição de recursos.

São apresentados os resultados de duas antenas *patch* retangular em microfita inspiradas em EBG produzidas para validar a eficiência das técnicas propostas, a primeira tem uma perfuração parcial em 88% (com relação à espessura do substrato) e a outra tem perfuração completa, ou seja, em 100%. Os resultados medidos e simulados apresentaram uma boa concordância métrica. Adicionalmente, são confrontados os dados de uma antena de referência (sem os furos EBG) simulada com os dados das antenas confeccionadas pelas técnicas de baixo custo.

As antenas inspiradas em EBG em 88% e 100% foram perfuradas com mini furadeira de mão (micro retífica) e o auxílio de um gabarito impresso; tal técnica não garante um alto grau de precisão na profundidade e distanciamento centro-a-centro dos furos. Na antena com perfuração em 100% o *patch* e o plano de terra foram produzidos a partir de fita de cobre adesiva. Já na antena com perfuração parcial o *patch* foi desenvolvido por corrosão em percloreto de ferro, após transferência térmica, sendo que seu plano de terra foi produzido por adesivo de cobre, como na primeira. Propriedades das antenas, materiais utilizados, custos financeiros, técnicas e resultados medidos e simulados são apresentados nas seções seguintes.

4.2.2 Características dos protótipos

4.2.2.1 Geometria e frequência

Para os *patches* dos protótipos utilizou-se a geometria retangular, de síntese rápida e vasta literatura publicada, dando margem para que o leitor interessado possa confrontar as antenas propostas com outras de igual geometria e frequência. A propósito, a frequência de 2,44 GHz (padrão 802.11g) foi a escolhida para o projeto. As dimensões do *patch* retangular foram calculadas pelas equações clássicas (13), (14) e (15), contidas no referencial teórico desta tese.

A alimentação escolhida foi por linha de microfita, que pode ser confeccionada juntamente com a antena. As equações (18) a (19), contidas no Referencial Teórico e provenientes de [2] [13] possibilitaram calcular a impedância em termos das dimensões e da permissividade efetiva da estrutura. Elas são válidas para linhas cuja largura seja maior que a espessura do substrato, ou seja, $W/h > 1$. Para os protótipos apresentados aqui se tem $W = 3$ mm para 50Ω de impedância. A propósito, para o casamento de impedância a técnica utilizada foi a de *inset feed*, cuja largura (determinante para a perda de retorno) foi otimizada numericamente para 0,7 mm de cada lado da linha e seu comprimento (determinante para f_0) é dado pela equação (20) também contida no referencial teórico e provenientes de [24], [25].

No tocante à geometria da malha EBG no substrato da antena, utilizou-se o modelo retangular abordado em muitos artigos, a exemplo de [46]. É um modelo de geometria vastamente utilizado, de simples implementação, além de revelar baixas perdas de retorno. No entanto, as técnicas apresentadas podem ser utilizadas em outras geometrias de malhas como hexagonal, quase periódica, etc.

A geometria dos furos aplicados no substrato é a cilíndrica, especificamente, furos com diâmetro de 2,5 mm e distanciamento centro-a-centro de 3,75 mm, concordando com a distância mínima de $a = 3r$ [38], sendo r o raio. Com relação ao procedimento mecânico, o mesmo envolve brocas de maior ou menor diâmetro, a depender do projeto considerado. Em [45] o autor realizou um estudo do comportamento eletromagnético de uma antena de microfita EBG quando alterado o diâmetro dos furos.

Como substrato dielétrico optou-se pelo material FR-4 (fibra de vidro), com $\epsilon_r = 4,4$ e espessura de 1,57 mm, que é um material comum e largamente utilizado. Outrossim, os efeitos de substratos EBG não são significativamente sentidos em substratos de baixa espessura [64]. Na Figura 4.2.2 é apresentado o esquemático das estruturas planares otimizadas e construídas.

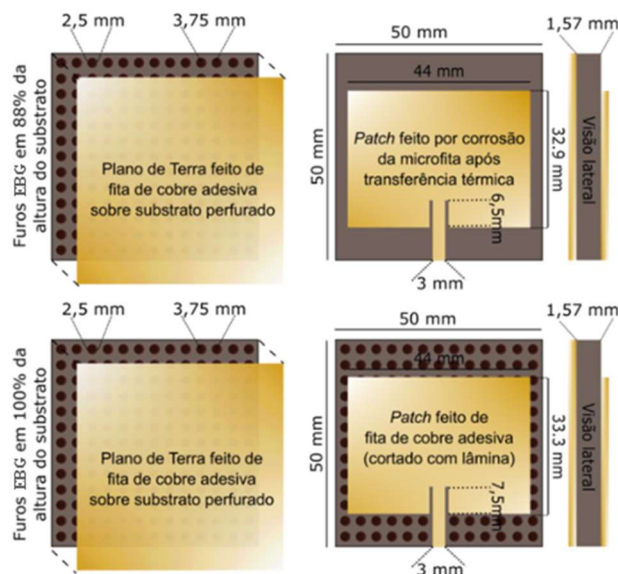


Figura 4.2.2: Esquemático das antenas inspiradas em EBG em 88% (acima) e 100% (abaixo) da espessura do substrato. Fonte: Autoria própria.

4.2.2.2 Técnicas utilizadas

Uma lista contendo as ferramentas e materiais básicos empregados na construção das estruturas é apresentada na Tabela 4.2.1, bem como seus respectivos valores nas seguintes moedas: Real brasileiro, Dólar americano e Euro da União Europeia. Conversões de valores para Dólar e Euro foram realizadas através de serviço *on-line* [70]. O baixo custo financeiro dos materiais que foram utilizados na técnica proposta é evidente. Para efeito de esclarecimento (em ocasião da leitura desta tese) o

grama do ouro era avaliado em R\$ 147,34 [71] no momento em que o artigo da referência [69], ao qual este subcapítulo remete, estava sendo produzido.

Tabela 4.2.1 Material utilizado para confecção das antenas inspiradas em EBG.

Itens utilizados	Custos Financeiros		
	<i>Real (R\$)</i>	<i>Dólar (US\$)</i>	<i>Euro (€)</i>
Placas - PCB (unid.)	7,20	2,16	1,76
Cortador de placa	7,00	2,10	1,71
Impressão do <i>transfer</i> e gabarito	≈ 1,00	0,30	0,24
Mini-furadeira	50,00	14,98	12,21
Kit de brocas	9,90	2,96	2,42
Kit para micro-retífica (opcional)	60,00	17,98	14,6
Micrômetro	90,00	26,97	22,00
<i>Transfer</i> (pacote com 5 unid.)	9,00	2,69	2,20
Caneta para PCB	7,00	2,10	1,71
Percloroeto de ferro (250g)	7,00	2,10	1,71
Cobre adesivo (1M x 50mm)	9,30	2,78	2,27
Conectores SMA (3 unid.)	10,50	3,14	2,56
Total	267,90	80,30	65,46

Fonte: Autoria própria.

4.2.2.3 Procedimentos para confecção das estruturas planares

Na Figura 4.2.3 são apresentados os materiais utilizados nas estruturas propostas na sequência em que se deram as etapas da produção. A seguir, os procedimentos de baixo custo para a confecção das estruturas planares (*guideline*):

(I). Projeto das estruturas em software de simulação. Aqui se utilizaram softwares comerciais. O usuário interessado em opções de baixo custo pode utilizar o software da instituição ou uma versão educacional, ou ainda implementar um método numérico;

(II). O passo seguinte foi cortar a placa PCB (*Printed Circuit Board*) no tamanho definido no projeto. O pesquisador interessado pode utilizar um cortador (ver preço na Tabela 4.2.1) de baixo custo, ou serra ou guilhotina da instituição;

(III). Perfuração da placa. Na ausência ou impossibilidade de utilizar uma prototipadora, há a possibilidade de utilização de uma mini furadeira (micro retífica) de mão (utilizada nos protótipos propostos) com ajuda de um gabarito impresso em papel, de modo a definir-se precisamente a localização dos furos. Para elaboração do gabarito é viável a utilização um software de desenho gratuito. Aqui se utilizou o Inkscape,

gratuito e de código aberto (software livre). Foram testadas brocas de tungstênio em formato convencional e em formato de pera - semelhante às brocas odontológicas. Um furo prévio de marcação foi feito com broca de 2 mm, posteriormente uma broca de 2,5 mm de espessura foi empregada para a conclusão da tarefa. Para os furos parciais foi afixada uma broca de maneira que não tivesse o alcance suficiente para transpassar o substrato, posteriormente foi utilizado um micrômetro que, com ajuda de um pequeno pino, permitiu mensurar a profundidade média dos furos – a saber, 88% (1,38mm) em relação à espessura do substrato;



Figura 4.2.3: Materiais para as estruturas na ordem das etapas da produção. Fonte: Autoria própria.

(IV). Otimização das simulações. Com os dados obtidos via micrômetro, ajustou-se a simulação da antena de furos parciais. Em caso de necessidade de ajuste de frequência de uma antena *patch* retangular, esse é obtido redimensionou-se a altura L do *patch*;

(V). Impressão e transferência térmica. No caso da antena de substrato com perfuração em 88% o desenho da antena (impresso no papel *transfer* com impressora a laser) foi transferido para o lado não perfurado. A transferência se deu com o auxílio de um ferro de passar típico. Nas partes do cobre onde a transferência térmica falhou, houverão ajustes com o auxílio de caneta para PCB (ver Tabela 4.2.1 e Figura 4.2.3);

(VI). Corrosão. Os protótipos foram submersos em percloro de ferro diluído em água na proporção de 250 g para 900 ml. Em ocasião de alguma parte não ser totalmente corroída, o interessado poderá utilizar lixa, contida no kit para micro retífica.

A qual poderá ainda ser usada para remover arestas indesejadas, após o corte e perfuração do substrato;

(VII). Corte e colocação dos adesivos. A fita adesiva de cobre foi afixada como plano de terra de ambas as antenas, sendo o excesso retirado com o auxílio de um estilete. No caso da antena com perfuração em 100%, o *patch* também foi obtido da fita de cobre, sendo recortado com auxílio de um modelo impresso;

(VIII). Reparo e polimento. As antenas foram submetidas à lixamento do substrato e polimento do cobre, para tal, utilizaram-se itens do kit para micro retífica. Na indisponibilidade do kit, o interessado pode polir com palha de aço seca, valendo-se de lixa comum para retirar arestas indesejadas do substrato;

(IX). Afixação dos conectores. Os conectores foram soldados com ferro e solda apropriados, itens geralmente disponibilizados pelas instituições;

(X). Aferição de parâmetros. As aferições foram realizadas em analisador vetorial da instituição. Em caso de indisponibilidade nas instituições, pesquisadores interessados podem contatar pesquisadores em outras instituições e fazer parcerias, de modo que os artefatos podem ser enviados por serviço postal.

Nas Figuras 4.2.4 e 4.2.5 são apresentados detalhes da produção dos protótipos.

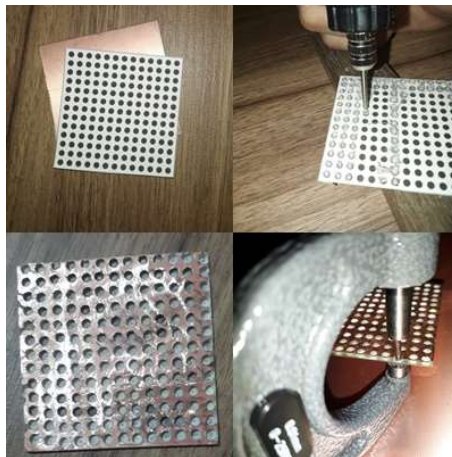


Figura 4.2.4: Marcação, perfuração e aferição da profundidade do substrato da antena inspirada em EBG em 88% da espessura. Fonte: Autoria própria.

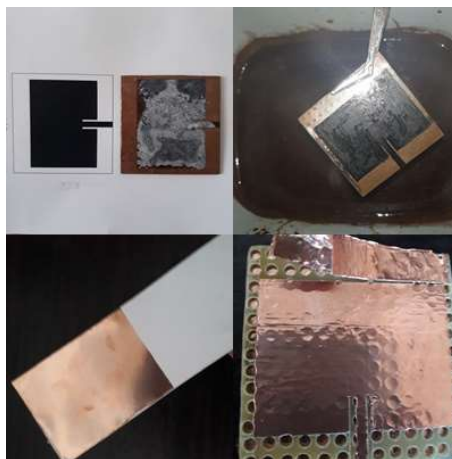


Figura 4.2.5: Transferência térmica e corrosão da antenna inspirada em EBG em 88% da espessura do substrato (acima) e *patch* por adesivagem da antenna em 100% (abaixo). Fonte: Autoria própria.

4.2.3 Resultados

Os resultados de aferição e simulação das estruturas propostas são apresentados nesta seção.

Na Figura 4.2.6 é exposta a perda de retorno da antenna com perfuração parcial (88%), cujo *patch* foi obtido por corrosão após transferência térmica e o plano de terra via adesivo de cobre. Os resultados revelam uma boa correspondência entre as frequências das duas simulações. Já o gráfico medido mostrou-se ligeiramente deslocado à direita (2,49 GHz), porém com uma ótima perda de retorno (S_{11} de -40,4 dB). É possível que haja uma pequena divergência entre simulação e medição em decorrência de alguns fatores, como a inexistência do conector na simulação [72]. A baixa perda de retorno é decorrente do excelente casamento de impedância (50Ω) como será visto mais adiante. Com relação à largura de banda, obteve-se 4,01% (100 MHz). Dado que antenas de microfita comuns tem largura de banda estreita, em torno de 3% [2], o percentual obtido pode ser considerado razoável.

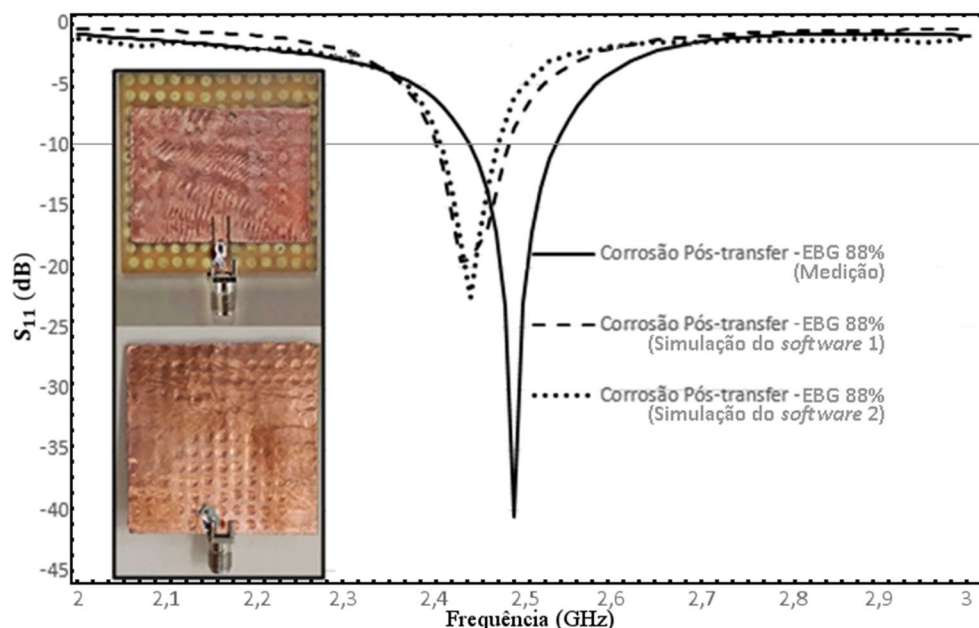


Figura 4.2.6: Perda de retorno medida e simulada para a antenna inspirada em EBG em 88% da espessura do substrato. Fonte: Autoria própria.

Na Figura 4.2.7 é exposta a perda de retorno da antenna com perfuração total (100%). Os resultados das simulações divergiram levemente, principalmente no que diz respeito à largura de banda, sendo a mensurada de 3,11%. A frequência mensurada ficou deslocada à direita, medindo 2,57 GHz, no entanto com boa perda de retorno (S_{11} de -19 dB). A confecção dessa antenna foi dificultada devido o *inset feed* ser feito por corte manual do laminado adesivo, ocasionando o deslocamento citado, o que é confirmado pela Carta de Smith da Figura 4.2.8 que revela uma impedância de 55Ω para a antenna inspirada em EBG em 100%, divergindo dos 50Ω de projeto. Na Carta de

Smith é exposto ainda que a antena em 88%, cujo *patch* foi gerado por corrosão obteve um perfeito casamento de impedância, visto que o marcador se encontra no centro da carta.

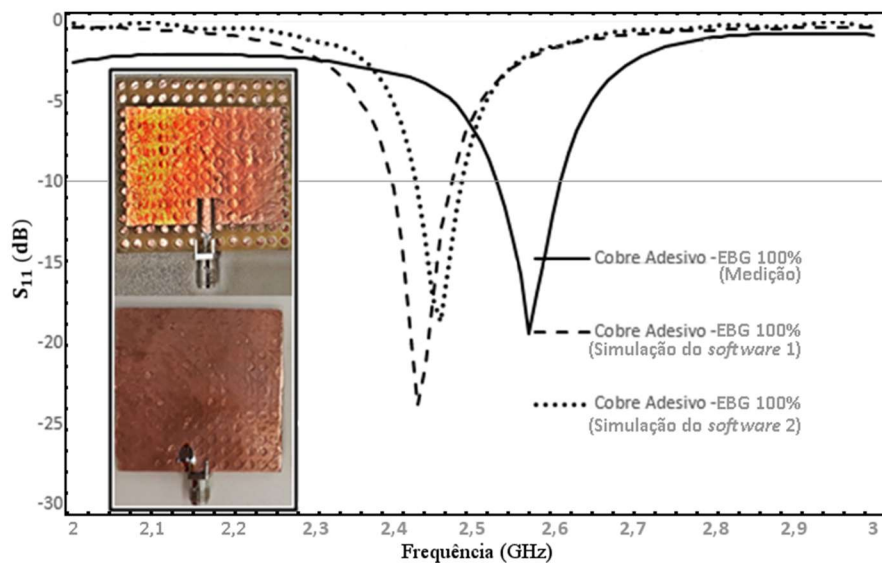


Figura 4.2.7: Perda de retorno medida e simulada para a antena inspirada em EBG em 100% da espessura do substrato. Fonte: Autoria própria.

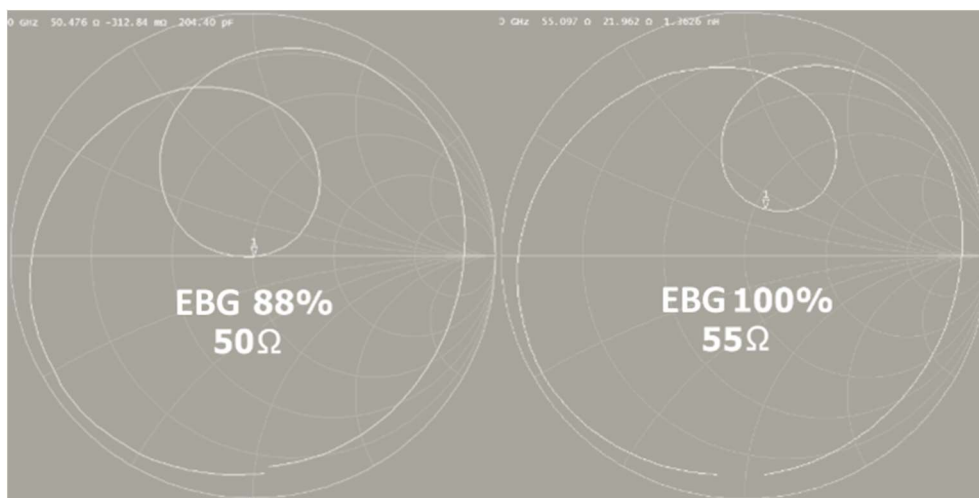


Figura 4.2.8: Carta de Smith medida para a antena inspirada em EBG em 88% (à esq.) e 100% (à dir.) da espessura do substrato. Fonte: Autoria própria.

Os diagramas de radiação (ganho em dBi) 3D simulados para ambas as antenas são apresentados nas Figuras 4.2.9 e 4.2.10. Os diagramas revelam um padrão esperado em antenas *patch* retangular. Os ganhos obtidos foram bons e devem-se ao uso dos substratos inspirada em EBG.

Na Figura 4.2.11 são apresentados diversos parâmetros para uma antena de referência simulada, à saber, uma antena *patch* retangular sem furos EBG. Os dados revelam largura de banda estreita (2,04%, 50 MHz), inferior as larguras de banda das antenas inspiradas em EBG propostas que mediram 4,01% (100 MHz) e 3,11% (80 MHz). Com relação aos ganhos simulados das antenas EBG propostas, também são

levemente superiores, 6,49 dBi (inspirada em EBG em 88%) e 6,41 dBi (inspirada em EBG em 100%) contra 6,09 dBi da antena de referência, sem os furos.

Os dados apresentados confirmam a viabilidade das técnicas de baixo custo propostas para a produção de antenas inspiradas em EBG. Procurou-se utilizar técnicas simples e de custo reduzido, correspondentes à motivação e objetivos desta vertente da pesquisa. Para alcançar maior precisão e reprodutibilidade, os pesquisadores interessados podem se valer de técnicas melhores, como furadeiras de bancada e adesivos recortados em gráficas para uma corrosão mais precisa.

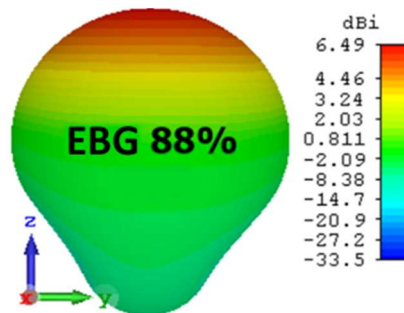


Figura 4.2.9: Ganho simulado (dBi) para a antena inspirada em EBG em 88% da espessura do substrato. Fonte: Autoria própria.

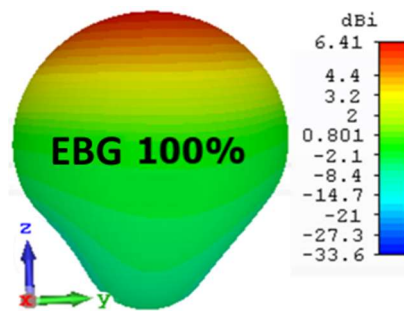


Figura 4.2.10: Ganho simulado (dBi) para a antena inspirada em EBG em 100% da espessura do substrato. Fonte: Autoria própria.

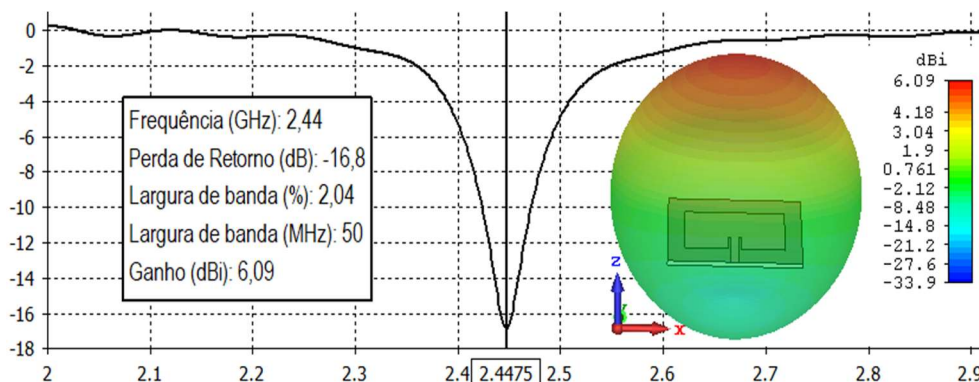


Figura 4.2.11: Parâmetros simulados para uma antena *patch* retangular de referência sem EBG. Fonte: Autoria própria.

4.2.4 Melhorias obtidas

Foram apresentadas técnicas simples de baixo custo para a produção de antenas de microfita inspiradas em EBG, de modo que duas antenas otimizadas foram

confeccionadas com materiais de custo módico, uma com perfuração parcial em 88% e outra em 100% da espessura do substrato, dispondo a primeira de *patch* obtido por corrosão em percloreto de ferro e a segunda de *patch* obtido através da afixação de fita adesiva de cobre.

Alguns parâmetros, como largura de banda das estruturas propostas, são superiores aos de antenas do mesmo tipo encontradas na literatura, sem furos EBG, bem como também em relação aos dados provenientes da antena de referência, simulada. Os custos reduzidos e os bons resultados reforçam a viabilidade das técnicas propostas, podendo ser utilizadas em ensino/pesquisa acerca de antenas de microfita com substratos inspirados em EBG nos quais haja restrição de capital.

4.3 Nova Antena Inspirada em EBG Quadriband em Forma de Cruz

Em setembro de 2018 ocorreu a conferência internacional ICEAA/APCW/FEM 2018, em Cartagena das Índias, Colômbia. Para essa conferência foi submetido pelo autor o artigo intitulado '*A Quadri-band PBG Antenna Cross-shaped For Wireless Communications*' [73], o qual foi aceito para apresentação oral (ver Figura 4.3.1). O referido artigo trata do projeto de uma nova antena baseada em uma estrutura de referência, desenvolvida durante o mestrado do autor. As seções seguintes trazem detalhes de procedimentos, melhorias obtidas e demais informações pertinentes.

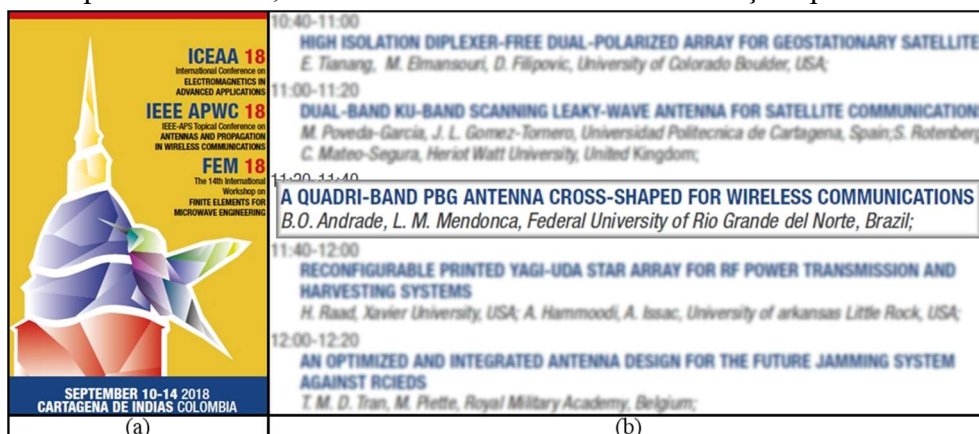


Figura 4.3.1: Programação final do ICEAA/APCW/FEM: (a) Logotipo, (b) Informações destacadas do artigo, autores e instituição. Fonte: Autoria própria.

4.3.1 Introdução

Muitos sistemas de telecomunicações modernos necessitam de antenas que operem em várias faixas de frequência, as chamadas antenas multibanda. As antenas de microfita também podem ser desejadas nesses tipos de sistema, já que são leves, de dimensões reduzidas e perfil adaptável a superfícies não planas [2], [15], [74] de modo que as mesmas podem ser construídas nos mesmos substratos dos circuitos transceptores.

O comportamento multibanda pode ser alcançado de diversas formas, em antenas de microfita, uma delas é largamente utilizada; trata-se do uso de geometrias

fractais (ou baseadas em fractais) no *patch*. Tal técnica foi aplicada inicialmente por Cohen [28], mas as bases matemáticas da teoria fractal remetem a Mandelbrot [4]. O comportamento multibanda é intimamente relacionado com a propriedade fractal da auto-semelhança [5].

No entanto, as antenas de microfita tem um severo problema, sofrem de largura de banda estreita e ganho reduzido. Substratos EBG (*Electromagnetic Band-Gap*) vêm sendo utilizados para solucionar tais problemas em antenas de microfita, já que podem suprimir a propagação de ondas eletromagnéticas em certos intervalos de frequência [35], denominados bandas proibidas.

Uma antena PGB *quadriband* em forma de cruz projetada pelo autor é apresentada, a qual superou uma antena de referência [14], [75] em vários aspectos, por dispor de maior facilidade de projeto, frequências de ressonância em maior número, melhor forma de casamento de impedância, melhor ganho e um diagrama de radiação mais adequado. O projeto dessa antena é apresentado nas seções seguintes, bem como seus resultados simulados para diversos parâmetros em dois softwares comerciais. Por fim, seus resultados são confrontados com os resultados da antena de referência, consolidando a viabilidade da mesma. Os dados revelam que a antena possui pelo menos quatro bandas úteis, um diagrama de radiação coerente e ganho satisfatório.

4.3.2 Caracterização do protótipo

O *patch* da antena proposta tem geometria baseada na antena de referência, já citada. Um esquemático mostrando as duas iterações fractais que formam o *patch* da antena de referência já foi apresentado em outro subcapítulo, na Figura 4.1.1. Na Figura 4.3.2 é apresentado o esquemático da antena *quadriband* em forma de cruz inspirada em EBG proposta. Seu projeto foi desenvolvido a partir de um *patch* retangular convencional obtido através das equações (13), (14) e (15) do referencial teórico. Tal *patch* foi dimensionado para a frequência de 2,44 GHz.

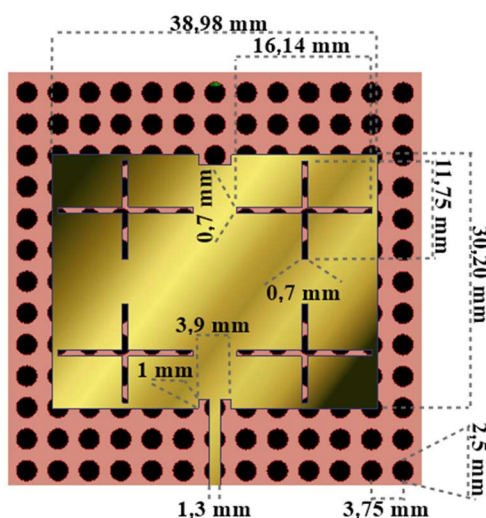


Figura 4.3.2: Esquemático da antena inspirada em EBG *quadriband* em cruz proposta. Fonte: Autoria própria.

Iniciar o projeto a partir das equações clássicas citadas foi a primeira melhoria da antena proposta com relação à antena de referência, pois sua primeira banda se situa próximo à frequência determinada pelas equações, facilitando o projeto. Na antena de referência o desenvolvimento do *patch* era totalmente numérico.

A retirada da cruz central na antena proposta foi a segunda melhoria, ao passo que essa deformava o diagrama de radiação (como será visto adiante) da antena de referência, ocasionando ganho ruim na direção de interesse.

A terceira melhoria decorre também da ausência da cruz central, já que possibilitou o uso de *inset feed* para o casamento de impedância. Na antena de referência o casamento se dava de forma complexa, intrinsecamente relacionado com as características do *patch* no ponto de inserção da linha de alimentação.

Como dito, a primeira frequência da antena proposta é decorrente das dimensões do *patch* retangular criado com auxílio das equações clássicas. As outras frequências são decorrentes das cruces extraídas da microfita, as quais tiveram suas dimensões obtidas numericamente. Ajustes nas dimensões dessas cruces e reentrância superior do *patch* (inicialmente iguais as dimensões do *inset feed*) podem ser utilizadas para deslocar as frequências.

Conforme exposto na Figura 4.3.2, a cruz central não foi colocada na antena proposta, pois dificultava o casamento de impedância e deformava o diagrama de radiação na direção de interesse, além de prejudicar o parâmetro do ganho.

A fim de melhorar ainda mais o ganho, utilizou-se na antena proposta um substrato inspirado em EBG com furos de 2,5 mm de diâmetro e *pitch* de 3,75 mm, dispostos em malha retangular. O *pitch* concorda com $a = 3r$ [38], onde r o raio do furo.

Como substrato utilizou-se o material FR-4, com $\epsilon_r = 4,4$ e espessura de 1,57 mm; mesmo material utilizado na antena de referência. Com relação ao plano de terra, ele está em toda a face oposta ao *patch*. A linha de alimentação tem largura de 1,3 mm, igual as reentrâncias do *inset feed*, do lado esquerdo e do direito da linha.

4.3.3 Resultados

4.3.3.1 Antena proposta

A Carta de Smith da Figura 4.3.3 revela que a antena proposta obteve um bom casamento de impedância para as suas quatro frequências de ressonância, conforme marcações próximas ao centro da mesma. Tal resultado se deu em decorrência da utilização de *inset feed*, ausente na antena de referência.

A retirada da cruz central na antena proposta aliada a utilização de substrato inspirado em EBG determinaram um bom diagrama de radiação (ver Figura 4.3.4), o que não ocorreu na antena de referência, pois a cruz central deformava o diagrama inclusive na principal direção de propagação, $\phi = 0^\circ$.

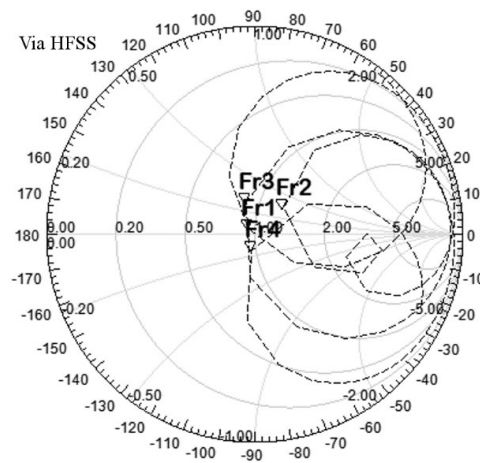


Figura 4.3.3: Carta de Smith simulada da antenna proposta. Frequências: Fr1: 2,34 GHz, Fr2: 3,79 GHz, Fr3: 4,44 GHz, Fr4: 5,79 GHz. Fonte: Autoria própria.

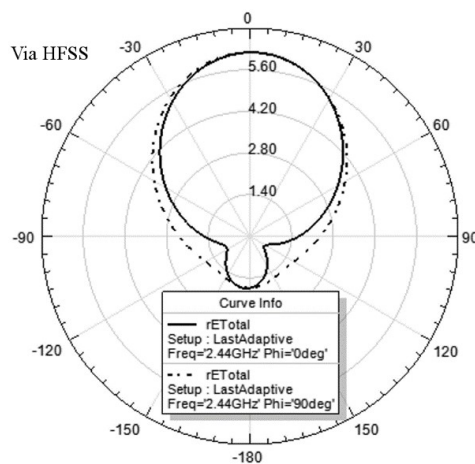


Figura 4.3.4: Diagrama de radiação padrão simulado da antenna proposta. Fonte: Autoria própria.

Na Figura 4.3.5 é exposta a perda de retorno simulada para as quatro frequências de ressonância da antenna proposta. As perdas de retorno são baixas, S_{11} entre -14,5 e -27,7 dB. As frequências e seus respectivos S_{11} são: 2,34 GHz (-27,7 dB), 3,79 GHz (-14,5 dB), 4,44 GHz (-15,9 dB) e 5,79 GHz (-21,8 dB).

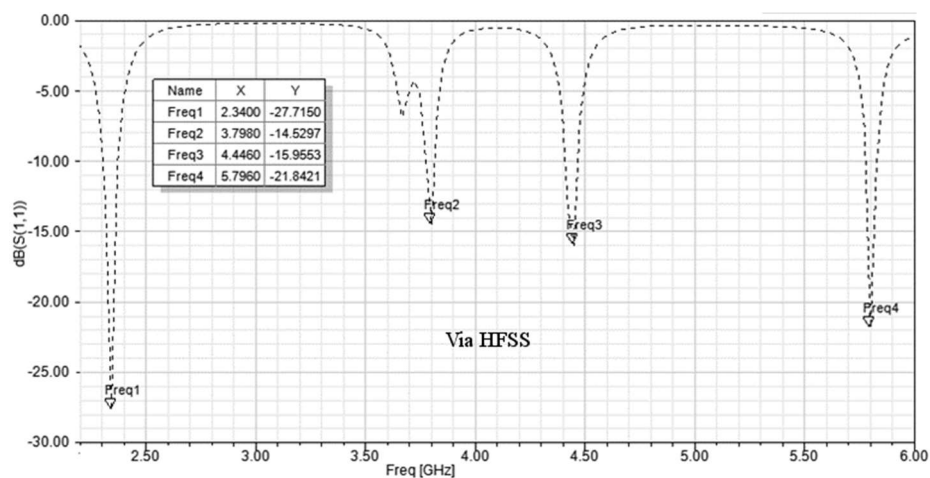


Figura 4.3.5: Perda de retorno da antenna proposta. Fonte: Autoria própria.

4.3.3.2 Antena proposta *versus* antena de referência

As perdas de retorno da antena proposta (simuladas em dois *softwares*) e da antena de referência foram confrontadas e são apresentadas na Figura 4.3.6. Na referência [75] foram apresentados dados simulados e medidos, mas os simulados eram de menor qualidade que os medidos, portanto, aqui optou-se pela comparação dos resultados da antena proposta em relação aos resultados medidos (e melhores) da antena de referência.

Ainda com relação a antena de referência, note que os dados da Figura 4.3.6 apresentam o gráfico do S_{11} até 4,43 GHz, apenas. Perceba que, para essa antena as perdas de retorno são muito altas; a primeira frequência ressoante em 2,33 GHz (ver Tabela 4.3.1), mas não é uma banda útil, pois o S_{11} não foi abaixo dos -10 dB. A segunda frequência, 3,66 GHz, obteve S_{11} de -11,2 dB. Somente a terceira frequência da antena de referência, 3,90 GHz, é bastante satisfatória. Com relação à antena proposta, as simulações de ambos os softwares revelam pelo menos quatro frequências de ressonância úteis. Na Tabela 4.3.1 é apresentado um comparativo entre a antena de referência e a antena proposta, para vários parâmetros.

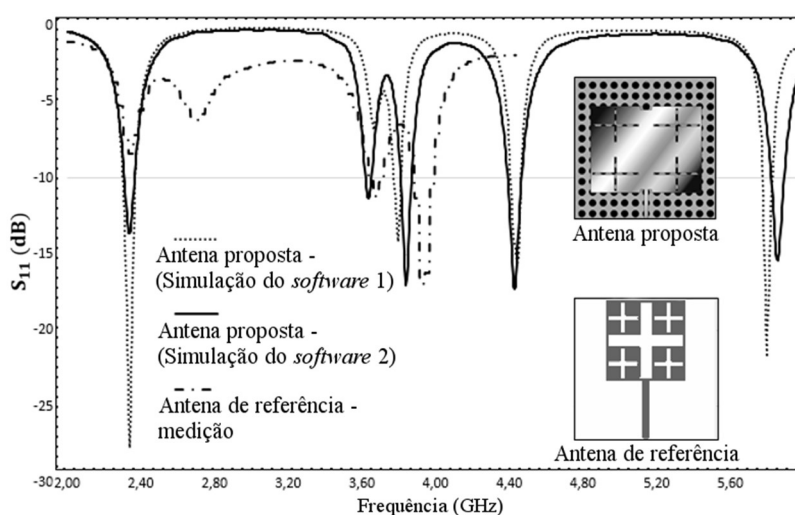


Figura 4.3.6: Perda de retorno *versus* frequência: antena proposta (simulações) *versus* antena de referência (medição). Fonte: Autoria própria.

Tabela 4.3.1 Parâmetros diversos - antena proposta *versus* antena de referência - frequência, S_{11} , magnitude da impedância de entrada da antena (Z) e largura de banda (MHz e percentual).

	Frequência (GHz)	S_{11} (dB)	Z (Ω)	Largura de banda (MHz)	Largura de banda (%)
Antena proposta (software 1)	2,34	-27,7	46,97	70	2,99
	3,66	—	—	—	—
	3,79	-14,5	65,73	40	1,05
	4,44	-15,9	46,06	60	1,35
	5,80	-21,8	48,48	60	1,03
Antena proposta	2,34	-13,63	40,74	60	2,56
	3,64	-11,31	87,51	40	1,09

	<i>Frequência (GHz)</i>	<i>S₁₁ (dB)</i>	<i>Z (Ω)</i>	<i>Largura de banda (MHz)</i>	<i>Largura de banda (%)</i>
<i>(software 2)</i>	3,84	-17,03	65,32	60	1,56
	4,44	-17,31	37,96	80	1,80
	5,86	-15,44	65,69	70	1,19
Antena de referência	2,33	—	—	—	—
	3,66	-11,2	58,48	60	1,64
	3,90	-16,9	62,81	90	2,31

Fonte: Autoria própria.

Observando a Figura 4.3.6 e Tabela 4.3.1 conclui-se que:

- Apesar das modificações na geometria, os gráficos da perda de retorno da antena de referência não divergem significativamente em relação aos gráficos da antena proposta;
- Ao contrário da primeira banda da antena proposta, a primeira frequência da antena de referência não é satisfatória;
- A segunda banda não foi apresentada na simulação do *software 1* (HFSS). Ela está presente na antena de referência e, mesmo estreita, na simulação do *software 2* para a antena proposta;
- A antena proposta revelou possuir ao menos quatro bandas úteis (se desconsiderada a segunda, e pior, banda), contra apenas duas da antena de referência;
- Todas as antenas apresentaram larguras de banda estreita;
- Em todas as antenas comparadas as impedâncias mostraram certa variação em torno dos 50 Ω.

Na Figura 4.3.7 é apresentado o diagrama de ganho total (dB) para a primeira frequência da antena proposta. Quando comparado com o diagrama de ganho da antena de referência (ver Figura 4.3.8), percebe-se que a utilização de substrato inspirado em EBG e/ou a ausência da cruz central no *patch* da antena proposta evitou que o ganho fosse negativo, como na antena de referência. No *software 2* os valores do ganho para antena proposta em sua primeira frequência foram em torno de 6,09 dBi.

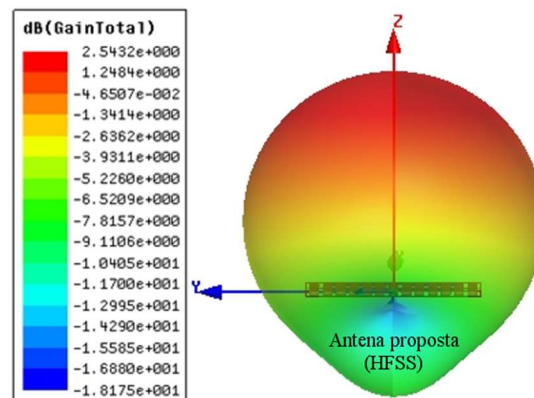


Figura 4.3.7: Ganho total (dB) simulado da antena proposta. Fonte: Autoria própria.

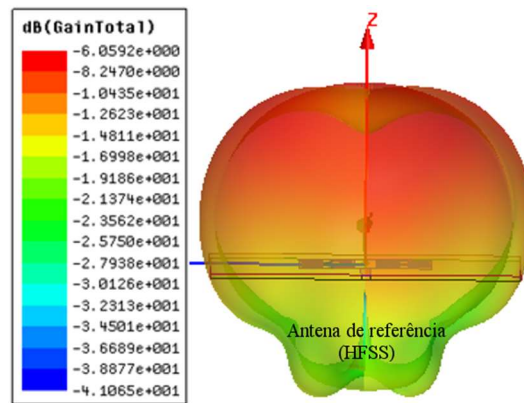


Figura 4.3.8: Ganho total (dB) simulado da antena de referência. Fonte: Autoria própria.

Por fim, verifica-se que, na antena proposta, a primeira frequência atua próximo dos 2,44 GHz (Padrão IEEE 802.11 - Wi-Fi) e a última em exatos 5,8 GHz (Padrão IEEE 802.16 - WiMAX). Em projetos futuros, alterações nas dimensões das cruzes e na reentrância superior do *patch* poderiam ser feitas a fim de ajustar as frequências, sendo assim, as duas bandas centrais poderiam ser projetadas com vistas em 3,5 GHz e 4,5 GHz, WiMAX e comunicações privadas ponto-a-ponto, respectivamente.

4.3.4 Melhorias obtidas

Nesta seção foram apresentados dados obtidos computacionalmente para uma antena inspirada em EBG multibanda em microfita com *patch* em forma de cruz, os quais foram confrontados com dados oriundos de uma antena de referência. A antena de referência possui um *patch* quase-fractal em cruz, porém, não apresentou um diagrama de radiação adequado. A antena proposta melhorou nesse quesito, além de promover melhor ganho. A antena proposta dispõe ainda de quatro bandas de operação, contra duas da antena de referência. Outras vantagens da antena proposta são: maior facilidade de projeto e uso de *inset feed* para um casamento de impedância simplificado. A primeira banda da antena proposta atua próximo aos 2,44 GHz (Padrão IEEE 802.11 - Wi-Fi) e a última em exatos 5,8 GHz (Padrão IEEE 802.16 - WiMAX). Em trabalhos futuros, modificações no comprimento e largura das ranhuras no *patch* poderiam ser feitas, buscando um ajuste nas frequências, isso posto, as duas bandas centrais poderiam ser aproveitadas para 3,5 GHz e 4,5 GHz, WiMAX e comunicações privadas ponto-a-ponto, respectivamente.

4.4 Invariância de Frequência, Aumento de Ganho e Projeto Rápido em Antenas Inspiradas em EBG Impressas 3D com Furos Quadráticos

Em 17 de Junho de 2019 foi publicado, na MOTL (*Microwave and Optical Technology Letters*), o artigo intitulado ‘*Frequency invariance, gain improvement, and fast design in 3D-printed photonic band gap antennas with quadratic holes*’ [76] do

² Créditos ao periódico (conforme permissão de uso especificada na licença): Frequency invariance, gain improvement, and fast design in 3D-printed photonic band gap antennas with quadratic holes, Betoven O. de Andrade e Laercio M. de Mendonca, Microwave and Optical Technology Letters, Volume 61, Edição 10, páginas 2295– 2305, © 2019 Wiley Periodicals, Inc. <https://doi.org/10.1002/mop.31897>

autor desta tese e coautoria de seu orientador. Neste subcapítulo são apresentados os resultados obtidos e as vantagens alcançadas com esta vertente da pesquisa.

4.4.1 Introdução

O advento das impressoras 3D impulsionou a produção de protótipos e projetos definitivos em geral. A seguir, é apresentado um estudo genuíno acerca da utilização de substratos sem e com arranjos inspirados em EBG, impressos em impressoras 3D, para antenas de microfita. As topologias de furos estudadas foram: cilíndrica e prisma quadrático. Foi investigada a utilização de geometrias de furo diferentes do tipo cilíndrico convencional - uma vantagem é que as frequências podem ser conservadas e o custo computacional reduzido. A conservação das frequências, por ocasião do uso de outras geometrias, desde que mantido o volume, é um estudo que não foi encontrado na literatura durante a pesquisa bibliográfica desta tese. Com relação ao custo computacional, é confirmado na prática que a tradicional geometria cilíndrica, por gerar uma malha maior, ocasiona um maior tempo de processamento durante o projeto.

As antenas inspiradas em EBG construídas também promoveram maior ganho, independente da geometria. Neste subcapítulo são mostrados os procedimentos utilizados e os comportamentos observados para os parâmetros de perda de retorno, casamento de impedância, largura de banda, eficiência de radiação e ganho, bem como equacionamentos, imagens microscópicas, etc.

Como dito no capítulo 3 (Referencial Teórico), as estruturas EBG podem ser produzidas em material condutor ou dielétrico. Esta pesquisa trata das modificações no substrato dielétrico, especificamente furos que transpassam o substrato e contém ar.

A ausência ou escassez de trabalhos que abordem outras geometrias de furos EBG, em substratos, talvez se dê pela dificuldade de perfurar um substrato convencional PCB (*Printed Circuit Board*) com formas diferentes da cilíndrica. O advento da tecnologia de impressão 3D (chamada também de 3DP, de *3D printing*) possibilitou a realização deste estudo, no qual são apresentadas as vantagens, dificuldades e comparações de resultados.

Existe uma quantidade razoável de artigos que tratam de antenas EBG, no entanto uma grande parcela enfatiza modificações no *patch*; outros destacam alterações no substrato, porém com enfoque no distanciamento dos furos, raio ou malha. Existem ainda estudos sobre a quantidade de ar decorrente do espaço de preenchimento, ou ainda, sobre furos de ar localizados no interior (centro no eixo Z) do substrato. A grande maioria desses trabalhos utilizam furos cilíndricos.

No estudo de referências bibliográficas não se encontraram artigos completos (com simulações e aferições) tratando diferentes tipos de furos que transpassem o substrato, provavelmente porque perfurações cilíndricas são intrinsicamente relacionadas às brocas utilizadas para perfurar substratos convencionais, feitos em PCB.

A tecnologia 3DP possibilitou realizar tal estudo, o que é apresentado neste subcapítulo. São abordadas as características eletromagnéticas entre dois diferentes tipos de furos.

4.4.2 Projeto e configuração das antenas

O material utilizado nesta pesquisa foi o ABS (*Acrylonitrile Butadiene Styrene*) de qualidade Premium+, marca 3DFila [77]. ABS é o polímero mais utilizado em impressão 3D, sua impressão é fácil e o custo é baixo. É um material termoplástico leve, rígido e que dispõe de boa resistência na absorção de impactos. O mesmo tem potencial reconhecido na fabricação de produtos moldados em diversas áreas.

Utilizou-se uma impressora modelo VOID1+, marca VOID3D [78], com qualidade de impressão na taxa de 0,05mm por altura de camada depositada. A impressão consiste em reproduzir um modelo 3D projetado em computador. O produto é gerado através da fundição do filamento do material e concomitante adição, camada a camada, até a reprodução completa do modelo projetado.

As geometrias utilizadas nos furos foram do tipo cilíndrico e prisma quadrático. O furo cilíndrico tem raio de 1,25 mm, gerando uma área de aproximadamente 4,90 mm², conforme equação (23). Para manter a mesma área, o lado do quadrado mede aproximadamente 2,21 mm, de acordo com a equação (24). Os cálculos foram baseados na área, porém, a espessura do substrato é igual entre as estruturas (1,57 mm), de modo que um mesmo volume foi obtido para os furos, dessa forma assegurou-se a qualidade da pesquisa.

$$A_c = \pi r^2 \approx 4,90 \quad (23)$$

Onde, A_c é a área do círculo.

$$S_s = \sqrt{A_c} \approx 2,21 \quad (24)$$

Onde, S_s é o lado do quadrado.

A malha (disposição dos furos) utilizada tem geometria retangular. O tipo de *patch* escolhido para este estudo também tem geometria retangular, pois há grande quantidade de literatura existente, permitindo que o leitor possa confrontar os resultados deste trabalho a outros. Com relação à construção, os *patches* foram obtidos por corrosão em percloroeto de ferro de um laminado de cobre cuja espessura é de aproximadamente 0,14 mm – essa técnica possibilitou protótipos precisos e semelhantes entre si. Os planos de terra foram cortados do mesmo laminado do *patch*, eles compreendem toda a área traseira das antenas, medindo 50x50 mm.

As antenas são alimentadas por linha de microfita, por ser localizada no mesmo plano da antena e pela facilidade de casar a impedância valendo-se da técnica de *inset feed*. O projeto do casamento de impedância foi para 50 Ω . Utilizou-se conector SMA tipo fêmea. Na Figura 4.4.1 é apresentado um esquemático das antenas propostas.

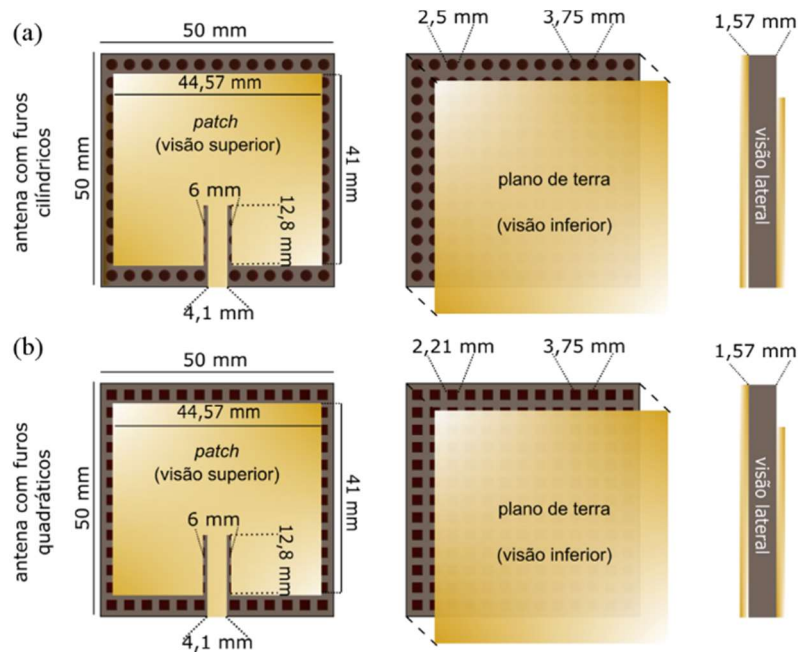


Figura 4.4.1: Esquemático das antenas: (a) Furos tipo cilíndrico, (b) Furos tipo prisma quadrático. Fonte²: Adaptado de [76] - alterações de cores, idioma e adição de visão lateral.

As duas antenas inspiradas em EBG foram projetadas para uma mesma frequência (*patches* iguais). Também foi confeccionada uma terceira antena, com o mesmo *patch*, porém sem furos EBG. Na Figura 4.4.2 são apresentadas as antenas construídas com furos no substrato. Na Figura 4.4.3 é exibida a antena sem furos EBG que foi utilizada como referência. Na Figura 4.4.4 é apresentada uma das fases da pesquisa, a saber, obtenção de imagens microscópicas para o artigo e para esta tese.

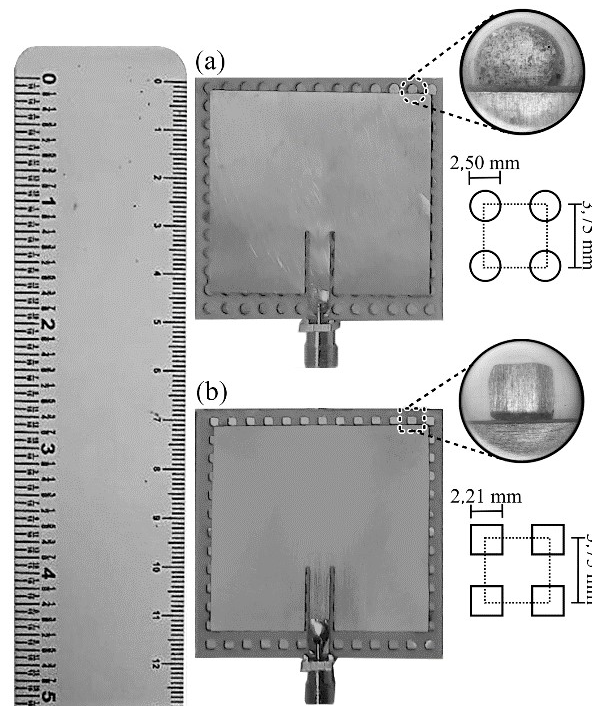


Figura 4.4.2: Fotografia das antenas inspiradas em EBG: (a) Com furos cilíndricos, (b) Com furos quadráticos. Fonte²: Adaptado de [76] - alterações de textuais.

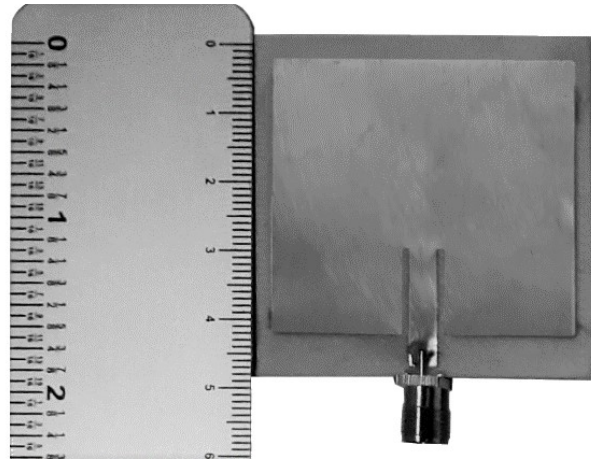


Figura 4.4.3: Fotografia da antena sem EBG. Fonte²: [76].



Figura 4.4.4: Obtenção de imagens ampliadas para a pesquisa. Fonte: Autoria própria.

4.4.3 Desempenho computacional

As malhas de simulação dos três protótipos, obtidas via HFSS, são apresentadas na Figura 4.4.5. Note que as subdivisões aplicadas pelo método numérico são triangulares. A malha com menos subdivisões pertence à antena sem furos, seguida da antena com furos quadráticos. A malha da antena com furos cilíndricos é composta de um número muito grande de subdivisões, de modo que mal se consegue ver os detalhes da antena. Quanto maior o número de subdivisões, maior o tempo gasto com o projeto computacional. Esse é um ponto a ser considerado em projetos práticos.

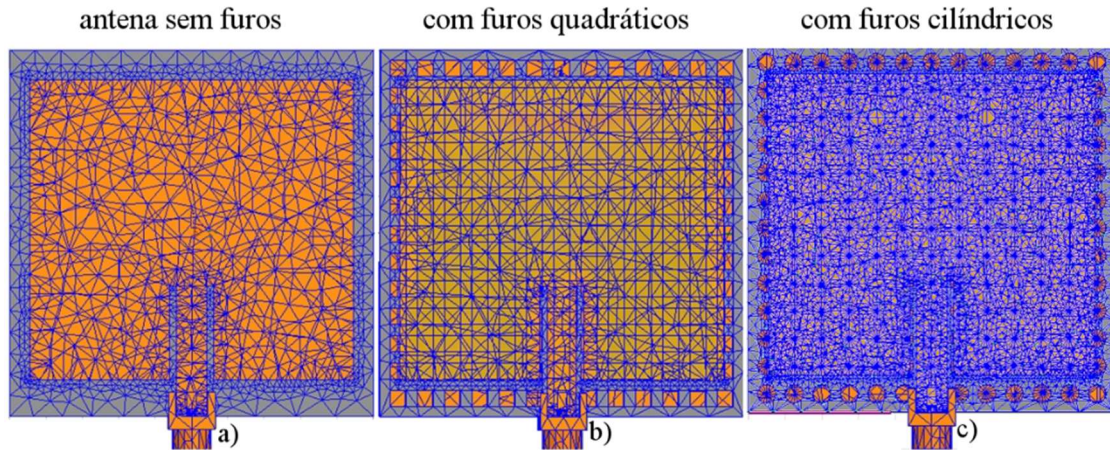


Figura 4.4.5: Malha de simulação numérica: (a) Antena sem furos, (b) Antena com furos quadráticos, (c) Antena com furos cilíndricos. Fonte²: Adaptado de [76] - alterações de idioma.

Um gráfico com o tempo médio de três simulações computacionais para cada antena é mostrado na Figura 4.4.6. As mesmas condições computacionais foram aplicadas aos protótipos. Mais de 12 minutos foram necessários para simular a antena com furos cilíndricos. Por outro lado, menos de 3 minutos foram necessários para simular a antena com furos quadráticos, a qual obteve tempo médio próximo ao da antena sem furos.

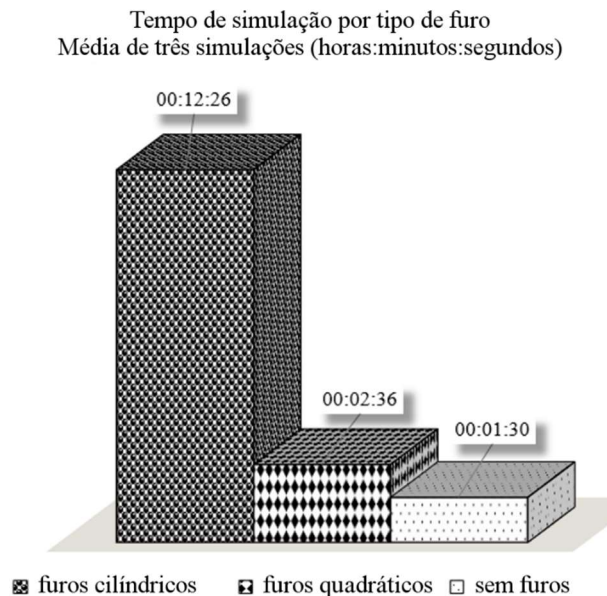


Figura 4.4.6: Tempo médio de simulação dos protótipos. Fonte²: Adaptado de [76] - alterações de idioma.

4.4.4 Resultados experimentais e numéricos

Os protótipos foram analisados de 1,5 GHz a 3,5 GHz. As antenas são as mesmas em *patches*, planos de terra, conectores e volume dos furos; a única diferença é o tipo de furo. Os resultados medidos foram obtidos com analisador vetorial de redes e um ambiente apropriado para medições. Os resultados simulados foram obtidos através do software comercial HFSS.

Os resultados das medições de perda de retorno (ver Figura 4.4.7) mostram que as duas antenas inspiradas em EBG têm a mesma frequência de ressonância: 2,64 GHz. A porcentagem de largura de banda das duas antenas também foi de aproximadamente 3%. A única diferença mostrada na Figura 4.4.7 é a perda de retorno: S_{11} de -26,9 dB na antena com furos cilíndricos e -22,5 dB na antena com furos quadráticos. Ambas as antenas obtiveram S_{11} bem abaixo dos -10 dB necessários para um bom desempenho.

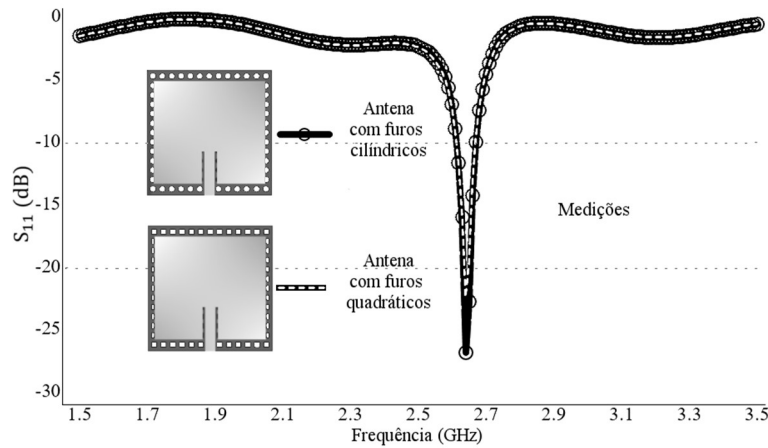


Figura 4.4.7: Perda de retorno *versus* frequência para as antenas inspiradas em EBG construídas. Fonte²: Adaptado de [76] – alterações textuais/idiomáticas.

Na Figura 4.4.8 são mostradas as medições e as simulações das antenas inspiradas em EBG. As frequências medidas são levemente deslocadas para a esquerda em relação às simulações, que marcaram 2,70 GHz com aproximadamente -23 e -25 dB de S_{11} . Pequenas divergências entre simulação e medição podem ocorrer por qualquer arbitrariedade no uso do software de simulação [72] ou no ambiente de aferição. A pequena divergência entre dados simulados e medidos também pode ter ocorrido devido a impossibilidade de caracterização da constante dielétrica do substrato nos laboratórios disponíveis. Perceba que a invariância de frequência (como resultado do tipo de furo) também ocorre entre as simulações.

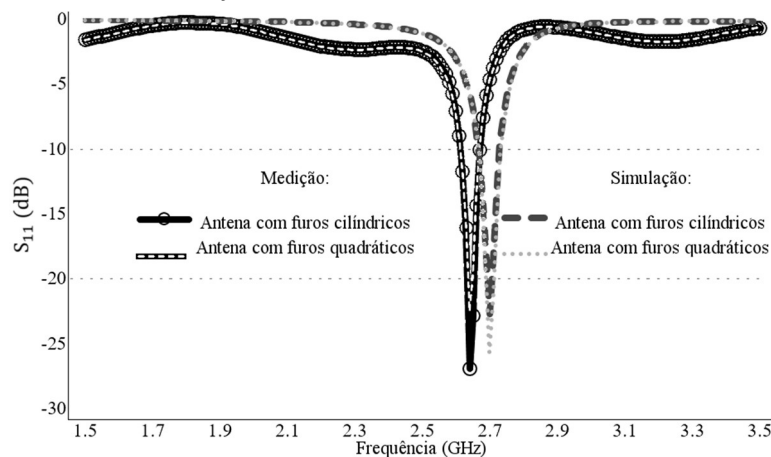


Figura 4.4.8: Perda de retorno *versus* frequência (simulação e medição) para as antenas inspiradas em EBG. Fonte²: Adaptado de [76] - alterações textuais/idiomáticas.

Na Figura 4.4.9 são expostas as perdas de retorno de todas as antenas construídas e simuladas. A antena sem EBG ressoou em 2,47 GHz com

aproximadamente -24 dB de S_{11} . Houve um pequeno deslocamento em relação à simulação: 2,45 GHz e aproximadamente -21 dB de S_{11} . O deslocamento de frequência entre a antenna sem furos e as antenas inspiradas em EBG era esperado, pois os furos introduzem uma permissividade elétrica menor (a permissividade do ar), aumentando a frequência. Na Figura 4.4.9 é revelado também que o uso de arranjos inspirados em EBG não afetou significativamente a largura de banda das antenas, que continuaram em torno dos 3%.

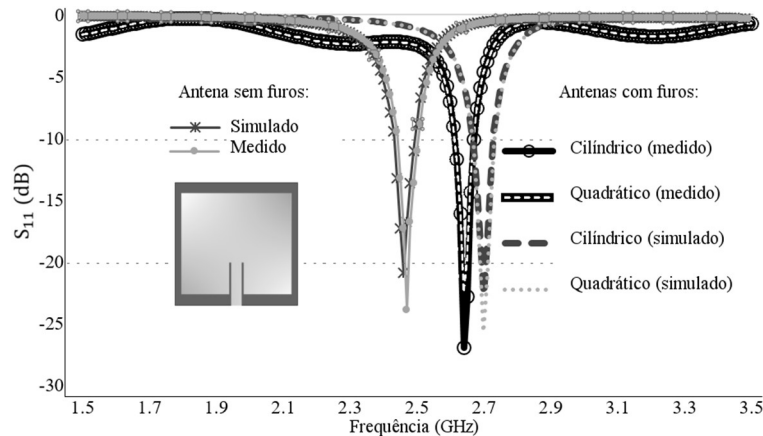


Figura 4.4.9: Perda de retorno *versus* frequência (simulação e medição) para todas as antenas. Fonte²: Adaptado de [76] - alterações textuais/idiomáticas.

A carta de Smith medida é apresentada na Figura 4.4.10. Com aproximadamente -20 dB de S_{11} é obtido um VSWR de aproximadamente 1:2, o que implica que mais de 99% da energia foi radiada e menos de 1% foi refletida. Neste estudo todas as antenas construídas obtiveram S_{11} menores que -20 dB. Isso ocorreu porque houve um bom casamento de impedância, conforme marcações próximas ao centro da carta. As impedâncias de entrada medidas são: 51 Ω para antenna sem EBG, 50 Ω para antenna com furos cilíndricos e 48 Ω para antenna com furos prisma quadrática.

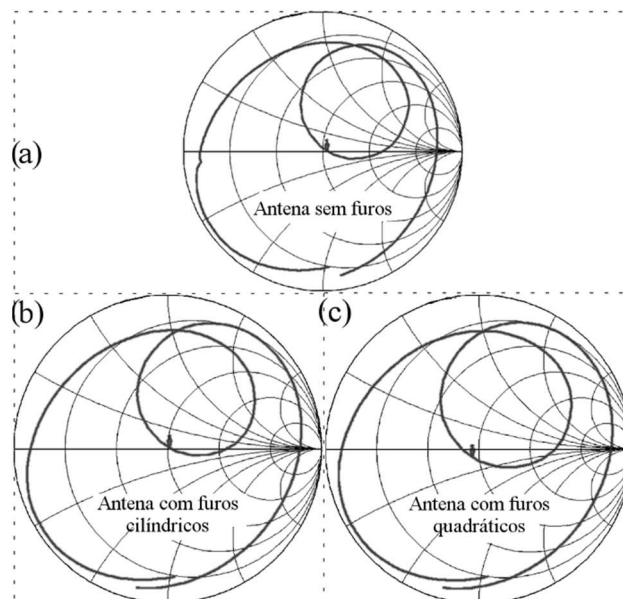


Figura 4.4.10: Carta de Smith medida para todas as antenas: (a) Antena sem EBG, (b) Antena com furos cilíndricos, (c) Antena com furos quadráticos. Fonte²: Adaptado de [76] - alterações de texto e borda.

Na Figura 4.4.11 são mostrados os diagramas de radiação simulados das antenas para $\varphi = 0^\circ$, $\varphi = 90^\circ$ e $\theta = 90^\circ$. O diagrama de radiação das antenas inspiradas em EBG apresentou um comportamento padrão, revelando que o uso de substrato ABS não prejudicou os protótipos nesse aspecto.

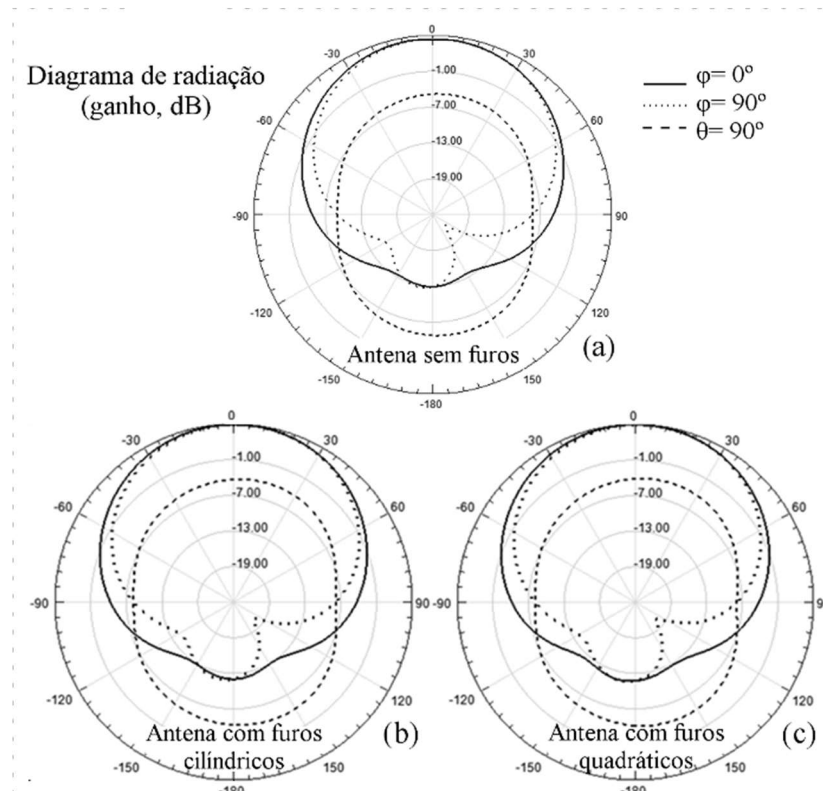


Figura 4.4.11: Diagrama de radiação simulado: (a) Antena sem EBG, (b) Antena com furos cilíndricos, (c) Antena com furos quadráticos. Fonte: Autoria própria.

Na Figura 4.4.12 são mostrados os ganhos medidos (dB) por ângulo (grau) nas principais direções, para as três antenas.

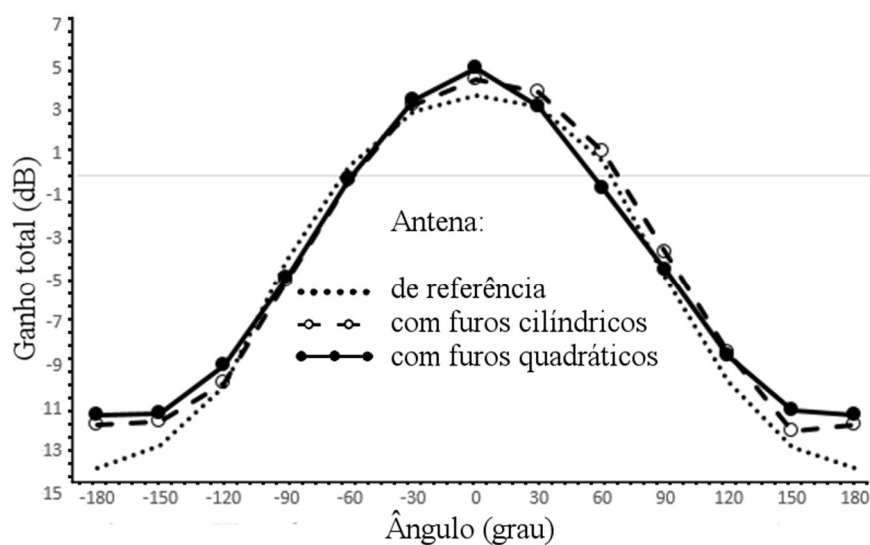


Figura 4.4.12: Ganho total (dB) por ângulo (grau) medido para todas as antenas em suas respectivas frequências. Fonte²: Adaptado de [76] – alterações textuais/idiomáticas.

Observe que o ganho das antenas inspiradas em EBG (especialmente com furos quadráticos) é maior que o ganho da antena sem furos. A antena de referência mediu um ganho de 3,75 dB (≈ 4 dB na simulação), com 55% de eficiência de radiação. A antena com furos cilíndricos mediu um ganho de 4,5 dB (≈ 5 dB na simulação), com 60% de eficiência de radiação. A antena inspirada em EBG com furos quadráticos apresentou um ganho de 5 dB, tanto na simulação como na medição, com 62% de eficiência de radiação. A Tabela 4.4.1 compila os ganhos e demais parâmetros apresentados ao longo deste subcapítulo.

Tabela 4.4.1 Principais parâmetros dos protótipos.

Antena	Frequência	S_{11}	Z	Eficiência	Ganho
	(GHz)	(dB)	(Ω)	-	(dB)
Medição					
Sem furos	2,47	-23,9	51	55	3,75
De furos cilíndricos	2,64	-26,9	50	60	4,50
De furos quadráticos	2,64	-22,5	48	62	5,00
Simulação					
Sem furos	2,45	-20,9	50	56	4,00
De furos cilíndricos	2,70	-22,7	50	61	5,00
De furos quadráticos	2,70	-25,6	50	62	5,00

Fonte²: Adaptado de [76] - alterações textuais/estilísticas.

Como já discutido nesta tese, as antenas de microfita tem seu ganho impactado pelas ondas que refletem e refratam no substrato, gerando correntes superficiais indesejadas, as quais desperdiçam energia. A título de enriquecimento do trabalho, a Figura 4.4.13 e a Figura 4.4.14 apresentam as correntes superficiais simuladas pelo HFSS para todos os três protótipos. Na antena sem furos é possível observar grandes áreas em azul, onde há baixa concentração de corrente. Na Figura 4.4.14 é apresentada uma distribuição de corrente melhor nas antenas inspiradas EBG, já que as áreas azuis são atenuadas e há menos concentração de corrente nas bordas laterais.

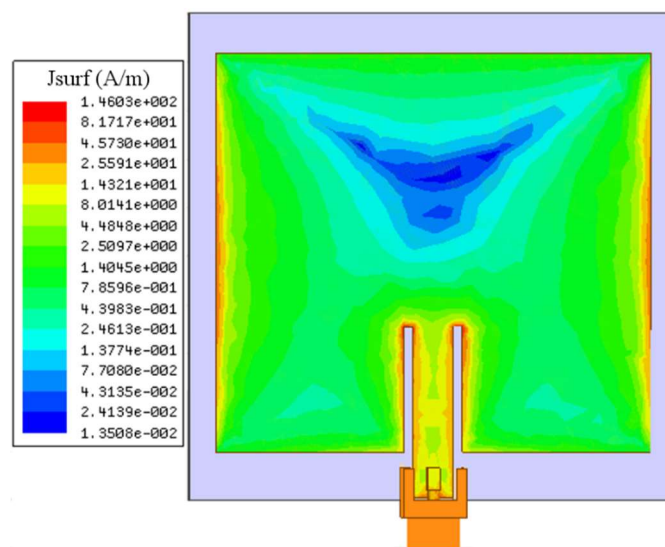


Figura 4.4.13: Distribuição de corrente de superfície (A/m) na antena sem furos. Fonte²: [76].

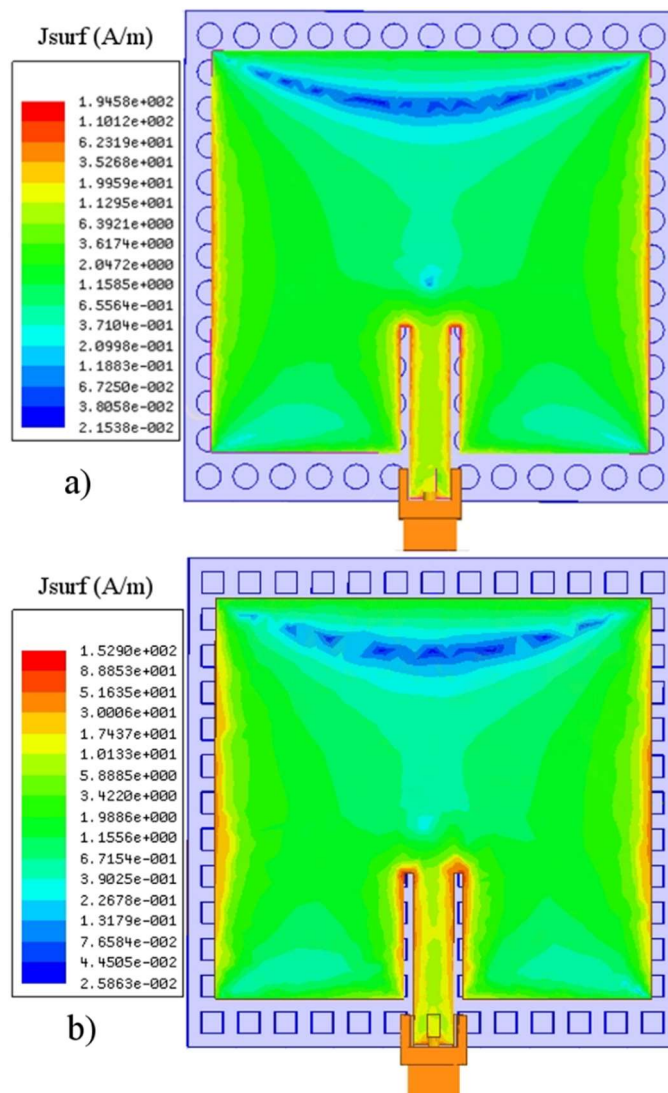


Figura 4.4.14: Distribuição de corrente de superfície (A/m) nas antenas inspiradas em EBG com: (a) Furos cilíndricos, (b) Furos quadráticos. Fonte²: Adaptado de [76] – alterações textuais.

4.4.5 Melhorias obtidas

- A utilização de impressão 3D possibilitou a investigação de uma geometria não-convencional (não-cilíndrica) de furo em substrato EBG;
- A pesquisa revelou que a geometria dos furos é irrelevante para a frequência de ressonância, desde que respeitados os volumes;
- Furos cilíndricos aumentam o tamanho das subdivisões da malha de simulação, deixando o projeto computacional muito lento;
- Os furos quadráticos propostos promoveram uma boa eficiência computacional, similar ao projeto da antena sem furos no substrato.

Neste subcapítulo foram apresentados os resultados de uma das cinco vertentes de pesquisa investigadas pelo autor e contidas nesta tese. Para encerrar o capítulo 4, uma última vertente é abordada no próximo subcapítulo. Ela trata de equações desenvolvidas pelo autor, visando melhorar o projeto de antenas de microfita com substratos EBG.

4.5 Equacionamento para Antenas de Microfita com Substratos EBG

Neste subcapítulo são apresentados equacionamentos desenvolvidos pelo autor desta tese a fim de facilitar o projeto de antenas de microfita cujos *patches* são calculados por equações analíticas. Ao inserir furos em um substrato, a permissividade desse é alterada. Como as equações analíticas para obtenção de dimensões de *patches* utilizam a permissividade dos substratos, seus resultados são comprometidos se o valor passado como parâmetro não considerar a alteração da permissividade, oriunda da inserção dos furos. As equações propostas aqui, visam calcular a permissividade de um substrato EBG, servindo como um fator de correção para as equações clássicas de cálculo de dimensões de *patch*, as quais não consideram furos no substrato.

4.5.1 Introdução

Um problema comum e pouco discutido das antenas com substratos EBG é que elas dificultam o projeto. Para entender melhor, pense em antenas de *patch* retangulares. Observe as equações (13), (14) e (15) do referencial teórico; elas determinam o tamanho de um *patch* retangular valendo-se de alguns parâmetros. Um desses parâmetros é a constante dielétrica ϵ_r do material. Ao utilizar substratos EBG, um ambiente híbrido é criado e a ϵ_r é alterada, o que influencia na largura do *patch* (13), na permissividade relativa efetiva (15) e, conseqüentemente, no comprimento do *patch* (14).

Se um substrato de permissividade baixa é adicionado a uma antena, sua frequência aumenta, do contrário, se um substrato de permissividade alta é adicionado a uma antena, sua frequência diminui. É por não considerar a permissividade alterada pela inserção de furos EBG que muitas pesquisas apresentam resultados diferentes entre a antena medida e seu projeto analítico.

Esta pesquisa foi motivada pela necessidade de obter equações que possam permitir um projeto preciso ou aproximado de antenas de microfita com substratos EBG, determinando um ϵ_r legítimo, que é chamado aqui $\epsilon_{r\text{eff}(\text{substrate})}$ (ϵ_r efetivo de um substrato EBG). Os objetivos específicos são: (i) desenvolver as equações; (ii) comprovar, a partir de simulações em diferentes cenários, que a mudança de frequência em relação ao projeto analítico não ocorreria ou seria atenuada; (iii) criar, medir e apresentar protótipos que validem a teoria.

4.5.2 Equacionamento proposto

A equação que determina o $\epsilon_{r\text{eff}(\text{substrate})}$ é simples; seu desenvolvimento se deu em relação à proporcionalidade do material e sua respectiva característica de permissividade. O passo-a-passo a seguir vai culminar na equação proposta.

Primeiro calcula-se o volume total do substrato. O volume total (V_{total}) do substrato convencional retangular (incluindo o volume dos furos) é de cálculo óbvio,

simplesmente multiplicando as dimensões de comprimento (ΔL), largura (ΔW) e espessura (Δh) do substrato, conforme equação (25):

$$V_{total} = \Delta L * \Delta W * \Delta h \quad (25)$$

O segundo passo é calcular o volume de uma unidade de furo (V_{hole}). Isso dependerá do formato do furo, se cilíndrico, calcula-se de acordo com a equação (26):

$$V_{hole} = h\pi r^2 \quad (26)$$

Onde h é a altura do cilindro, r o raio.

Agora, o volume do material principal (V_{mat}) do substrato (o qual contém os furos) pode ser calculado, conforme equação (27):

$$V_{mat} = V_{total} - V_{hole} \cdot n \quad (27)$$

Onde n é o número de furos no substrato.

Dadas as etapas acima, é fácil encontrar qual é a porcentagem do material principal ($mat_{\%}$) e qual é a porcentagem do material das lacunas ($hole_{\%}$) no substrato, conforme equações (28) e (29):

$$mat_{\%} = \frac{V_{mat} \cdot 100}{V_{total}} \quad (28)$$

$$hole_{\%} = 100 - mat_{\%} \quad (29)$$

Finalmente, para encontrar a permissividade efetiva do substrato EBG ($\epsilon_{r_{eff}(substrate)}$), basta somar os produtos das porcentagens dos materiais pelos seus respectivos valores de permissividade, conforme equação (30):

$$\epsilon_{r_{eff}(substrate)} = \epsilon_{r_{mat}} \cdot mat_{\%} + \epsilon_{r_{hole}} \cdot hole_{\%} \quad (30)$$

Inserindo (28) e (29) em (30) e simplificando algebricamente, obtemos a versão estendida, dada na equação (31):

$$\epsilon_{r_{eff}(substrate)} = \left(\frac{\epsilon_{r_{mat}} \cdot V_{mat}}{V_{total}} \right) + \left(\frac{\epsilon_{r_{hole}} \cdot V_{hole} \cdot n}{V_{total}} \right) \quad (31)$$

4.5.3 Protótipos simulados e resultados numéricos

Para comprovar a eficiência da equação (31) proposta, inicialmente são apresentados resultados de simulação para o projeto de três diferentes grupos de antenas, com diferentes configurações de substratos inspirados em EBG, para as

seguintes frequências: 2,44 GHz (Padrão IEEE 802.11g - Wi-Fi), 3,5 GHz (Padrão IEEE 802.16d - WiMAX fixo) e 5 GHz (Padrão IEEE 802.11a - Wi-Fi). Ao total são simuladas oito antenas diferentes, duas geometrias distintas de furos (cilíndrico e prisma quadrático) e três tipos de materiais: Ar, Fr-4 e ABS. Como as simulações foram em dois softwares, totalizaram-se dezesseis simulações para as oito antenas. Na Figura 4.5.1 são apresentados os três grupos de antenas simuladas. Na Tabela 4.5.1 é mostrado para quais frequências cada uma das oito antenas dos três grupos foi simulada, além das dimensões e outras características.

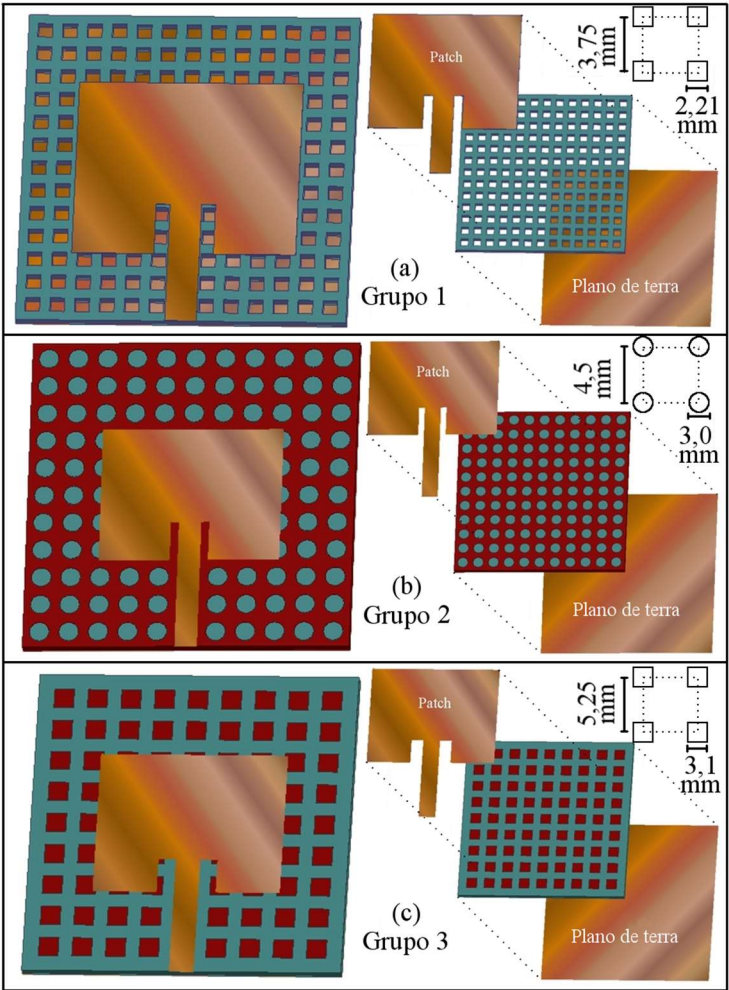


Figura 4.5.1: Grupos de protótipos simulados: (a) Antenas com substrato ABS e furos quadráticos preenchidos com ar, (b) Antenas com substrato FR-4 e furos cilíndricos preenchidos com material ABS, (c) Antenas com substratos ABS e furos quadráticos preenchidos com FR-4. Fonte: Autoria própria.

Tabela 4.5.1 Grupos de antenas simuladas e suas características: frequência, material do substrato, material do furo, tipo de furo, quantidade de furos, volume de furo unitário, *pitch*, *W* e *L* do *patch*.

	Freq. (GHz)	Substrato material	Furo material	Furo tipo	Furo quantidade	Furo vol. mm3	Pitch mm	W mm	L mm
Grupo 1	3,50	ABS	Ar	prisma quadrático	13x13	7,70	3,75	33,86	28,04
	5,00							23,70	19,31
	2,44							39,45	30,91
Grupo 2	3,50	FR-4	ABS	cilíndrico	11x11	11,09	4,50	27,50	21,35
	5,00							19,25	14,71
	2,44							41,91	33,36
Grupo 3	3,50	ABS	FR-4	prisma quadrático	9x9	15,10	5,25	29,21	23,03
	5,00							20,45	15,87

Fonte: Autoria própria.

Na Figura 4.5.2 são mostrados os gráficos de perda de retorno simulada das antenas do grupo 1, projetadas para 3,5 GHz e 5 GHz. Essas antenas possuem o mesmo substrato, ABS com furos quadráticos preenchidos de ar. Os dados mostram que, embora as simulações dos dois softwares mostrem perdas de retorno diferentes (sobretudo na segunda faixa), elas têm larguras de banda parecidas. O mais importante nessa figura é que nela é revelado que as frequências não se deslocaram, provando que as equações se mostraram eficientes para o caso. A antena para 2,44 GHz não está presente neste grupo porque as dimensões do *patch* seriam muito grandes para o tamanho fixado para o substrato (50 x 50 x 1,57 mm³).

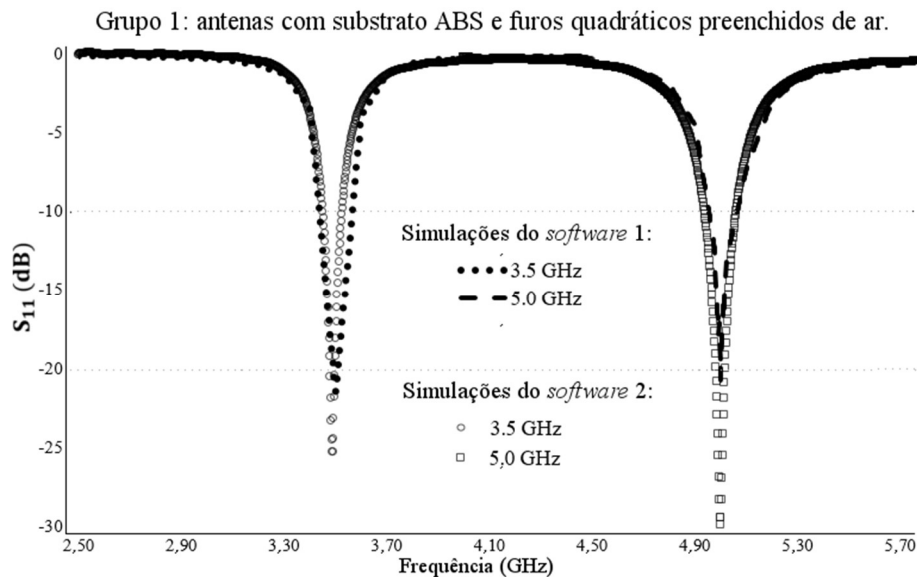


Figura 4.5.2: Perda de retorno *versus* frequência (simulação): antenas do grupo 1. Fonte: Autoria própria.

Na Figura 4.5.3 são mostrados os gráficos de perda de retorno das antenas do grupo 2, projetadas para 2,44 GHz, 3,5 GHz e 5 GHz.

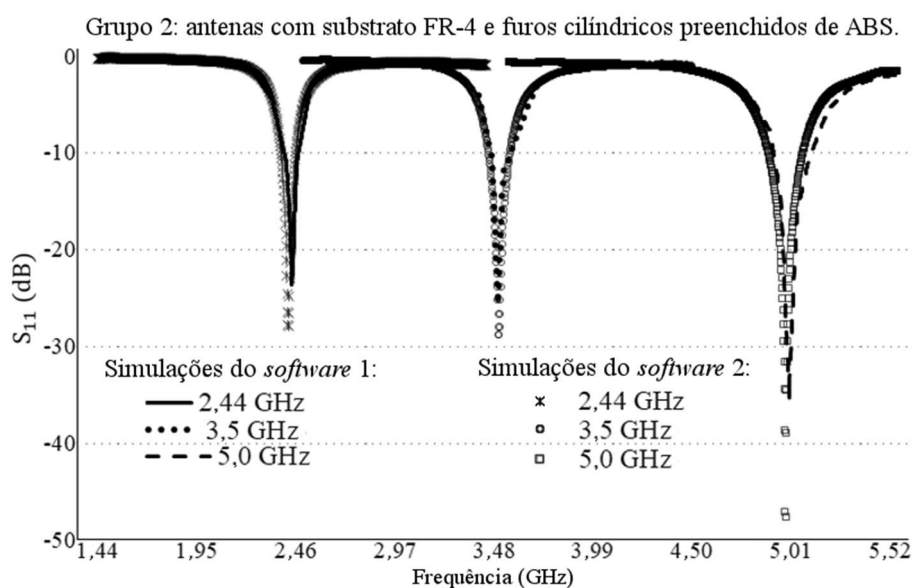


Figura 4.5.3: Perda de retorno *versus* frequência (simulação): antenas do grupo 2. Fonte: Autoria própria.

As antenas do grupo 2 possuem o mesmo substrato, FR-4 com furos cilíndricos preenchidos com material ABS. O ar é geralmente usado como preenchimento dos furos, mas nesta pesquisa foram utilizados outros materiais para garantir que as equações propostas funcionariam, inclusive, sob essas condições. Na Figura 4.5.3 também é revelado que as simulações obtidas em um dos softwares são mais otimistas quanto à perda de retorno, no entanto, as larguras das bandas são muito semelhantes. Mais uma vez o deslocamento entre as duas simulações e as frequências de projeto foi mínima.

Na Figura 4.5.4 são mostrados os gráficos de perda de retorno das antenas do grupo 3, projetadas para 2,44 GHz, 3,5 GHz e 5 GHz. As três antenas deste grupo têm o mesmo substrato, ABS com lacunas quadráticas preenchidas com FR-4. Os dados mostram que a primeira antena mostrou um leve deslocamento entre as duas simulações. A antena para 3,5 GHz mostrou muita concordância entre as duas simulações, principalmente no que diz respeito à largura de banda. Para a antena de 5 GHz, a simulação do HFSS estava mais otimista quanto à largura de banda e menos otimista quanto à perda de retorno. Mais uma vez houve uma minimização do deslocamento entre as duas simulações e as frequências de projeto.

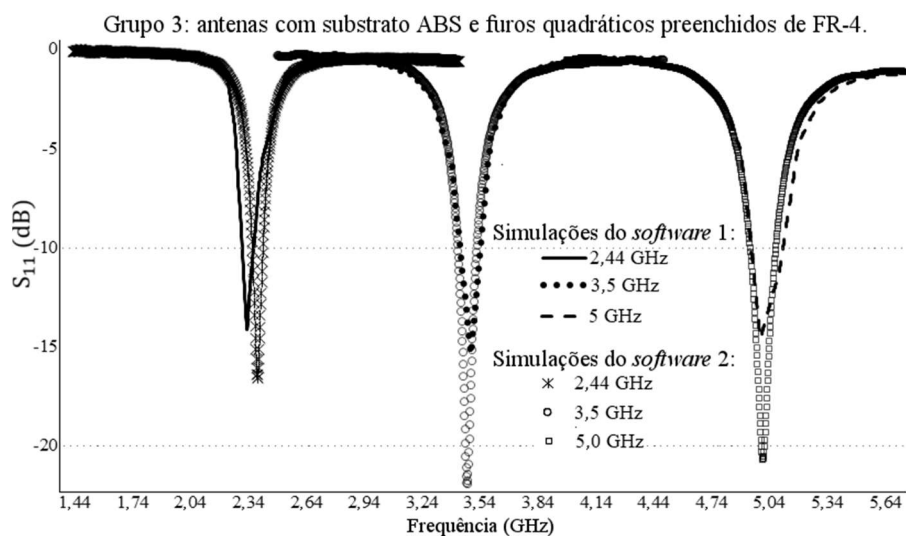


Figura 4.5.4: Perda de retorno *versus* frequência (simulação): antenas do grupo 3. Fonte: Autoria própria.

Durante as simulações foi observado que o modo como as portas (necessárias para as condições de contorno) são calculadas e utilizadas pode ser ligeiramente diferente entre os dois softwares, de modo que pequenos ajustes nas dimensões (e/ou diferenças entre os tipos) das portas levava a resultados ligeiramente diferentes. Outros fatores, como o design do conector e qualquer arbitrariedade no uso do software de simulação, também podem causar diferenças [72].

Em geral, notou-se que todas as antenas simuladas mantiveram suas frequências muito próximas das frequências do projeto analítico (o qual determinou as dimensões do *patch* através de equações clássicas). Isso não ocorre quando, no projeto

analítico, apenas a constante dielétrica característica do material no qual os furos são feitos é usada. Assim, as equações propostas atenderam ao objetivo, em nível de simulação, para diferentes frequências e grupos de antenas. Para uma melhor investigação das equações propostas, três protótipos foram construídos e verificados, os quais são apresentados na próxima seção.

4.5.4 Protótipos construídos e resultados experimentais

Na Figura 4.5.5 são mostrados três protótipos construídos para a mesma frequência. São eles:

- (a) Antena sem furos EBG;
- (b) Antena com furos inspirados em EBG e *patch* calculado analiticamente sem considerar a influência da permissividade dos furos de ar, ou seja, sem utilizar o equacionamento proposto;
- (c) Antena com furos inspirados em EBG e *patch* calculado analiticamente com o auxílio das equações propostas aqui.

Note que as dimensões da antena (c) foram maiores porque o ar gerou uma permissividade total menor, tornando-se necessário aumentar o *patch* para diminuir a frequência e compensar o deslocamento. Essa compensação de tamanho ocorreu exatamente através do uso das equações propostas.

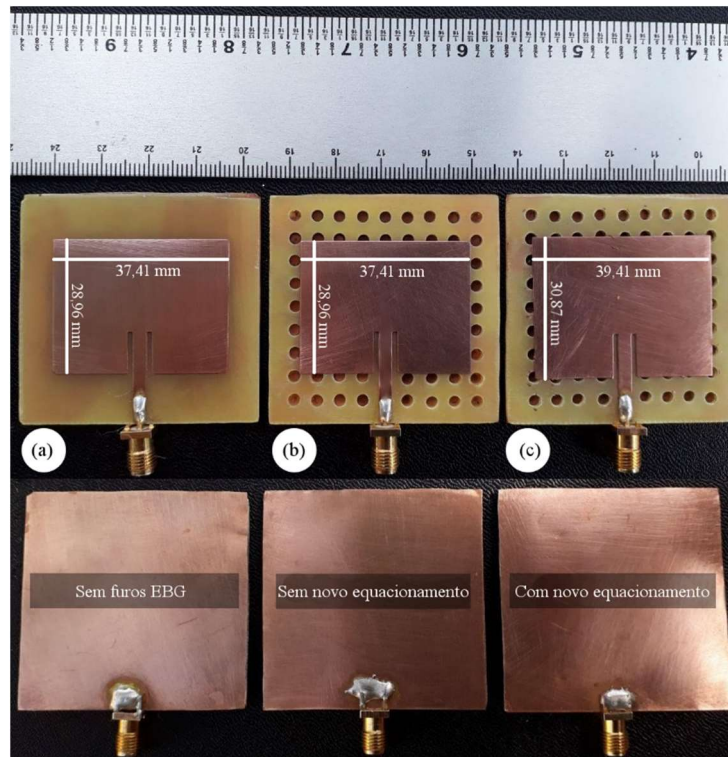


Figura 4.5.5: Protótipos construídos: (a) Sem furos EBG, (b) Com furos e *patch* obtido sem auxílio do equacionamento, (c) Com furos e *patch* obtido com auxílio do equacionamento proposto. Fonte: Autoria própria.

O substrato usado em ambas as antenas foi o FR-4 com $\epsilon_r = 4,4$. As antenas inspiradas em EBG possuem 1,25 mm de raio e *pitch* de 5 mm, distribuídos em uma malha retangular de 9 x 9. O laminado de cobre usado no *patch* e no plano de terra possui 0,14 mm de espessura, mais espesso que os fabricados em conjunto com os substratos, o que gerou um leve deslocamento de frequência em todas as antenas. Além disso, a técnica usada para realizar as perfurações parciais [69] não garante um alto grau de precisão na profundidade e distanciamento centro-a-centro. Todas as antenas medem 50 x 50 x 1,57 mm³, possuem um plano de terra completo e foram conectorizadas com conector SMA fêmea.

Na Figura 4.5.6 são mostradas as perdas de retorno medidas para todas as antenas construídas. Os resultados não são comparados com simulação numérica porque as antenas foram projetadas analiticamente, através das equações (13), (14) e (15). Na Tabela 4.5.2 é exposto que todas as antenas apresentaram largura de banda em torno de 3%, o que é convencional em antenas de microfita [2].

Observando a Figura 4.5.6 e a Tabela 4.5.2, nota-se que a antenna que utilizou as equações propostas obteve um menor deslocamento de frequência em relação à antenna sem furos EBG. Portanto, a antenna inspirada em EBG que não considerou a mudança na permissividade introduzida pelos orifícios obteve um maior deslocamento.

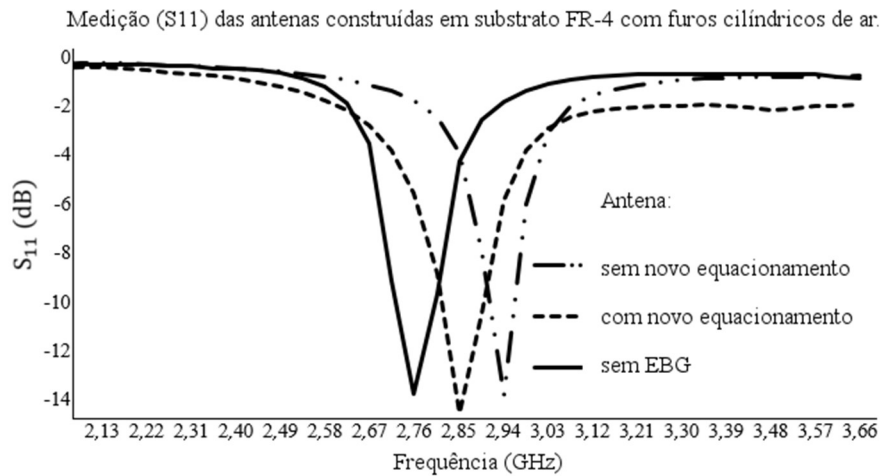


Figura 4.5.6: Perdas de retorno medidas para os três protótipos construídos. Fonte: Autoria própria.

A impedância de entrada medida para a antenna sem EBG foi de aproximadamente 44 Ω . Para as antenas inspiradas em EBG, a impedância medida foi de aproximadamente 40 Ω . A frequência central e a largura de banda (MHz e %) dos três protótipos são mostradas na Tabela 4.5.2.

Tabela 4.5.2 Frequência e largura de banda dos protótipos construídos.

Antena	Frequência (GHz)	Bandwidth (MHz)	Bandwidth (%)
Sem EBG	2,75	90	3,26
Com equacionamento EBG	2,85	90	3,16

Sem equacionamento			
EBG	2,94	80	2,72

Fonte: Autoria própria.

4.5.5 Melhorias obtidas

- Novos equacionamentos foram propostos permitindo melhor caracterizar a constante dielétrica de substratos EBG utilizados em antenas de microfita;
- Com a constante dielétrica obtida do equacionamento proposto, foi possível calcular adequadamente os *patches* de 8 (oito) antenas simuladas, com diferentes substratos e furos não somente de ar, evitando assim, os deslocamentos de frequência;
- Uma antena construída e medida, cujo *patch* retangular foi obtido com o auxílio do equacionamento proposto, mostrou melhores características eletromagnéticas e menor deslocamento de frequência que sua concorrente, cujo *patch* desconsiderou a constante dielétrica dos furos.

Capítulo 5

Conclusões

Nesta tese foram apresentados cinco estudos sobre antenas de microfita com substratos inspirados em EBG, de modo que foram expostas novas soluções para cada um deles, enriquecendo assim, o estado da arte na área de antenas de microfita com esse tipo de substrato. No capítulo introdutório apresentou-se a motivação, justificativa, hipóteses e objetivos da pesquisa, além de contextualizar o leitor com a temática central do objeto de estudo. No capítulo 2, Metodologia, foram mostrados os passos seguidos para a concretização dos estudos, desde a pesquisa bibliográfica até a redação desta tese, passando pelos procedimentos que garantiram a integridade dos resultados. No capítulo 3, Referencial Teórico, foram abordados de forma introdutória tópicos essenciais para o entendimento dos resultados desta tese, sendo assim, espera-se que o mesmo sirva de embasamento para leitores leigos e de forma revisória para especialistas.

No capítulo 4 apresentou-se, de fato, os resultados obtidos pelo autor durante a pesquisa. Foram expostos os resultados de protótipos simulados e/ou construídos em cada um dos subcapítulos. A propósito, cada subcapítulo correspondeu a uma das vertentes pesquisadas. Segue um breve resumo sobre cada uma delas:

(I) Uma Rede Neural Artificial possibilitou generalizar a perda de retorno de antenas de substratos inspirados em EBG com furos parciais, de modo que o usuário/pesquisador pode obter as perdas de retorno dadas profundidades arbitrárias para os furos, reduzindo o total de tempo despendido com simulações numéricas;

(II) Foram apresentadas técnicas de baixo custo desenvolvidas com o intuito de viabilizar pesquisas acerca de antenas de microfita com substratos inspirados em EBG, nas quais haja restrição de capital;

(III) Uma nova antena *quadriband* com substrato inspirado em EBG foi proposta. Além de dispor de um maior número de bandas de operação em relação à antena de referência, a mesma melhorou o diagrama de radiação e aumentou o ganho, além de promover maior flexibilidade de projeto;

(IV) Antenas inspiradas em EBG, cujos substratos foram impressos em impressora 3D, foram utilizadas para provar que a geometria do furo não implica em deslocamentos de frequência, desde que respeitados os volumes. Adicionalmente, foi provado que uma antena de furos não-convencionais tipo prisma quadrático promoveu uma melhor eficiência computacional durante as simulações; superior ao desempenho quando utilizados os tradicionais furos cilíndricos, já que os furos cilíndricos aumentam o tamanho das subdivisões da malha de simulação, deixando o projeto computacional muito mais lento;

(V) Um novo equacionamento foi proposto a fim de permitir uma melhor caracterização da constante dielétrica de substratos EBG, evitando ou diminuindo deslocamentos de frequência em relação ao projeto analítico. O equacionamento proposto retorna um valor de permissividade o qual considera as constantes dielétricas do material no qual os orifícios foram produzidos e do material de preenchimento dos furos. O equacionamento proposto permitiu calcular adequadamente os *patches* de 8 (oito) antenas simuladas, com diferentes tipos de substratos e furos. Protótipos também foram construídos e constatou-se menor deslocamento de frequência em relação ao projeto analítico.

As vertentes IV e V foram as de maior impacto na pesquisa de doutorado do autor; elas confirmam as hipóteses levantadas na introdução desta tese.

Como sugestões para trabalhos futuros, propõe-se: (i) construção, aferição e estudo de novas antenas impressas com outras geometrias de furo, diferentes da cilíndrica convencional e da quadrática proposta; (ii) construção e aferição de antenas inspiradas em EBG com furos dopados de material diferente do ar; (iii) dar continuidade a pesquisa dos equacionamentos, construindo novos protótipos, inclusive impressos, e caracterizando a constante dielétrica dos mesmos com o auxílio de equipamento adequado; (iv) testar as equações propostas em substrato EBG de antenas para frequências maiores; (v) realizar a análise dos modos ressonantes das antenas propostas;

Referências

- [1] “Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update, 2016–2021 White Paper - Cisco”. [Online]. Disponível em: <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/mobile-white-paper-c11-520862.html>. [Acessado: 07-nov-2018].
- [2] C. A. Balanis, *Antenna theory: analysis and design*, 4. ed. Hoboken, New Jersey: Wiley, 2016.
- [3] J. R. James e P. S. Hall, Orgs., *Handbook of microstrip antennas*. London, U.K.: P. Peregrinus on behalf of the Institution of Electrical Engineers, 1989.
- [4] B. B. Mandelbrot, *The fractal geometry of nature*, Updated and augmented. New York, NY: Freeman, 1983.
- [5] J. P. Gianvittorio e Y. Rahmat-Samii, “Fractal antennas: a novel antenna miniaturization technique, and applications”, *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 44, nº 1, p. 20–36, fev. 2002.
- [6] A. C. Gil, *Como elaborar projetos de pesquisa*. São Paulo: Atlas, 2002.
- [7] E. M. Lakatos e M. A. Marconi, *Fundamentos de metodologia científica*. São Paulo: Atlas, 2003.
- [8] N. D. Macedo, *Iniciação à pesquisa bibliográfica: guia do estudante para a fundamentação do trabalho de pesquisa*. Edicoes Loyola, 1995.
- [9] “IEEE Xplore Digital Library”. [Online]. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/Xplore/home.jsp>. [Acessado: 07-nov-2018].
- [10] “Zotero | Your personal research assistant”. [Online]. Disponível em: <https://www.zotero.org/>. [Acessado: 07-nov-2018].
- [11] A. J. Severino, *Metodologia do trabalho científico*, 23º ed. São Paulo: Cortez, 2007.
- [12] C. A. Balanis, *Teoria de Antenas - Análise E Síntese*. Rio de Janeiro: LTC, 2009.
- [13] D. M. Pozar, *Microwave engineering*, 4. ed. Hoboken, NJ: Wiley, 2012.
- [14] B. O. de Andrade, “Estudo de arranjos de antenas de microfita com Patch quase-fractal para comunicações sem fio”, Dissertação de Mestrado, UFRN, Natal, 2014.
- [15] V. F. Fusco, *Teoria e Técnicas de Antenas: Princípios e Prática*. Bookman Editora, 2006.
- [16] F. R. Cavalcanti, T. Maciel, W. Freitas Jr, e Y. Silva, *Comunicação Móvel Celular*. Elsevier Brasil, 2018.
- [17] N. C. Braga, *Curso de Eletrônica - Volume 5 - Telecom - 1 - Radiocomunicações*. Editora Newton C. Braga, 2017.
- [18] “POLARIZAÇÃO DE ONDAS”. [Online]. Disponível em: <https://www.qsl.net/py4zbz/antenas/polarizacao.htm>. [Acessado: 14-nov-2018].
- [19] J. Volakis, *Antenna Engineering Handbook*, 4. ed. McGraw-Hill Companies, Incorporated, 2007.
- [20] D. Grieg e H. Engelmann, “Microstrip-A New Transmission Technique for the Kilomegacycle Range”, *Proceedings of the IRE*, vol. 40, nº 12, p. 1644–1650, dez. 1952.
- [21] G. A. Deschamps, “Microstrip microwave antennas”, apresentado em 3rd USAF Symposium on Antennas, LEWIN.L, 1953.
- [22] “Microstrip Antennas: The Patch Antenna”. [Online]. Disponível em: <http://www.antenna-theory.com/antennas/patches/antenna.php>. [Acessado: 19-nov-2018].
- [23] R. C. Moreira, “Antenas planares integradas com FSSs para aplicações em sistemas de comunicações sem fio”, Dissertação de Mestrado, UFRN, Natal, 2012.
- [24] M. Ramesh e Y. Kb, “Design Formula for Inset Fed Microstrip Patch Antenna”, *Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications (JMoe)*, vol. 3, nº 3, p. 5–10, 2003.
- [25] J. C. Silva, “Análise Experimental do Efeito de Diversas Configurações de ‘inset Feed’ Na Alimentação de Antenas Planares dos Tipos Retangular, Circular e Triangular”, *Revista Principia - Divulgação Científica e Tecnológica do IFPB*, nº 24, p. 49–56, 2014.

- [26] M. A. Matin e A. I. Sayeed, "A Design Rule for Inset-fed Rectangular Microstrip Patch Antenna", *WTOC*, vol. 9, nº 1, p. 63–72, jan. 2010.
- [27] K. Singh, V. Grewal, e R. Saxena, "Fractal Antennas: A Novel Miniaturization Technique for Wireless Communications", *International Journal of Recent Trends in Engineering*, vol. 2, p. 172–176, 2009.
- [28] N. Cohen, "Fractal antennas and fractal resonators", US6452553B1, 17-set-2002.
- [29] S. Kuzu e N. Akcam, "Array Antenna Using Defected Ground Structure Shaped With Fractal Form Generated by Apollonius Circle", *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 16, p. 1020–1023, 2017.
- [30] K. Wei, J. Y. Li, L. Wang, R. Xu, e Z. J. Xing, "A New Technique to Design Circularly Polarized Microstrip Antenna by Fractal Defected Ground Structure", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 65, nº 7, p. 3721–3725, jul. 2017.
- [31] H. Ozdemir e T. Nesimoglu, "Investigation of electromagnetic energy harvesting by using fractal antenna", in *2017 Computing and Electromagnetics International Workshop (CEM)*, Barcelona, Spain, 2017, p. 41–42.
- [32] M. Yousef e A. Abdel-Rahman, "Realization of multi-band antenna for WiMAX and RFID by etching two interlaced triangles from delta resonator", in *2017 34th National Radio Science Conference (NRSC)*, Alexandria, 2017, p. 79–86.
- [33] H. A. Elmobarak, S. K. Rahim, M. Himdi, X. Castel, e T. A. Rahman, "Low cost instantly printed silver nano ink flexible dual-band antenna onto paper substrate", in *2017 11th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP)*, Paris, France, 2017, p. 3061–3063.
- [34] H. Mosallaei e Y. Rahmat-Samii, "Photonic band-gap (PBG) versus effective refractive index: a case study of dielectric nanocavities", 2000, vol. 1, p. 338–341.
- [35] M. Qiu e S. He, "High-directivity patch antenna with both photonic bandgap substrate and photonic bandgap cover", *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 30, nº 1, p. 41–44, jul. 2001.
- [36] V. G. Veselago, "The eletrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ ", *Soviet Physics Uspekhi*, vol. 10, nº 4, p. 509–514, abr. 1968.
- [37] E. A. Hajlaoui e H. Trabelsi, "Improvement of Circularly Polarized Slot-Patch Antenna Parameters by Using Electromagnetic Band Gap Structures", *Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications*, vol. 15, nº 4, p. 428–440, dez. 2016.
- [38] A. S. Maia, "Estudo Do Comportamento Dos Parâmetros De Antenas De Microfita Utilizando Diferentes Configurações De Arranjos De Estruturas EBG/PBG", Dissertação de Mestrado, UFERSA, Mossoró - RN, 2016.
- [39] L. F. Vieira, F. G. Silva, A. D. Sisnando, e V. F. Esquerre, "Artificial immune system optimisation of complete bandgap of bidimensional anisotropic photonic crystals", *IET Optoelectronics*, vol. 9, nº 6, p. 333–340, dez. 2015.
- [40] P. Kumar, S. Dwari, Utkarsh, e J. Kumar, "Design of Biodegradable Quadruple-shaped DRA for WLAN/Wi-Max applications", *Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications*, vol. 16, nº 3, p. 867–880, set. 2017.
- [41] Y. Zhaowei, Q. Jianjun, C. Xiangyu, e L. Tao, "Study of Ground Defect PBG Structure in Cylindrical Microstrip Patch Antennas", in *2006 7th International Symposium on Antennas, Propagation & EM Theory*, Guilin, China, 2006, p. 1–3.
- [42] H. Andrade, R. Júnior, H. Fernandes, e M. Araújo, "Estudo das Propriedades de Radiação de uma Antena de Microfita para Diferentes Configurações de Estruturas EBG/PBG", in *MOMAG 2014: 16º SBMO - Simpósio Brasileiro de Micro-ondas e Optoeletrônica e 11º CBMag - Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo*, Curitiba, 2014, p. 688–691.
- [43] N. kushwaha e R. Kumar, "Study of Different Shape Electromagnetic Band Gap (EBG) Structures for Single and Dual band Applications", *Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications*, vol. 13, nº 1, p. 16–30, 2014.
- [44] A. S. Arezoomand, M. Naser- Moghadasi, I. Arghand, P. Jahangiri, e F. B. Zarrabi, "Photonic band gap implementation for phase centre controlling in Vivaldi antenna", *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, vol. 11, nº 13, p. 1880–1886, out. 2017.

- [45] Á. O. Guimarães, J. P. Silva, e J. P. Pereira, “Analysis of a microstrip antenna with variation on substrate PBG hexagonal”, *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 58, nº 4, p. 826–831, abr. 2016.
- [46] J. P. Pereira, J. P. Silva, Á. O. Guimarães, “Microstrip antennas design based in periodic and quasiperiodic PBG symmetries”, *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 57, nº 12, p. 2914–2917, dez. 2015.
- [47] “Materiais para impressão 3D”, *Cammada*. [Online]. Disponível em: <https://www.cammada.com/materiais>. [Acessado: 21-nov-2018].
- [48] “Material de Impressão 3D - Plástico, Metal e muitos outros | 3Dilla”. [Online]. Disponível em: <http://pt.3dilla.com/materiais/>. [Acessado: 21-nov-2018].
- [49] A. Lasprilla, “Síntese do poli-ácido láctico a partir do ácido láctico para aplicação biomédica”, Dissertação de Mestrado, UNICAMP, Campinas, 2011.
- [50] “VOID3D | Impressão 3D em Natal/RN”. [Online]. Disponível em: [//void3d.com.br/](http://void3d.com.br/). [Acessado: 21-nov-2018].
- [51] B. Biernacki, S. Zhang, e W. Whittow, “3D printed substrates with graded dielectric properties and their application to patch antennas”, apresentado em 2016 Loughborough Antennas & Propagation Conference (LAPC), 2016, p. 1–5.
- [52] W. Baines e R. Dahle, “Enhanced bandwidth microstrip patch antennas through 3-D printing”, apresentado em: 2016 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation (APSURSI), Fajardo, 2016, p. 815–816.
- [53] S. Jun e B. Sanz-Izquierdo, “A CPW-fed antenna on 3D printed EBG substrate”, apresentado em 2015 Loughborough Antennas & Propagation Conference (LAPC), 2015, p. 1–5.
- [54] M. Rizwan, M. Khan, L. Sydanheimo, J. Virkki, e L. Ukkonen, “Flexible and Stretchable Brush-Painted Wearable Antenna on a Three-Dimensional (3-D) Printed Substrate”, *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 16, p. 3108–3112, 2017.
- [55] S. Haykin e P. M. Engel, *Redes neurais: princípios e prática*. Porto Alegre: Bookman, 2001.
- [56] I. Silva, D. Spatti, e R. Flauzino, *Redes Neurais Artificiais para Engenharia e Ciências Aplicadas: Curso Prático*. ARTLIBER, 2010.
- [57] H. Aliakbari, A. Abdipour, A. Costanzo, D. Masotti, R. Mirzavand, e P. Mousavi, “ANN-based design of a versatile millimetre-wave slotted patch multi-antenna configuration for 5G scenarios”, *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, vol. 11, nº 9, p. 1288–1295, jul. 2017.
- [58] A. Kumar e A. Rai, “Resonant Frequency of Microstrip Antenna Using Artificial Neural Network”, in *International Conference of Advance Research and Innovation (ICARI-2014)*, 2014, p. 330–334.
- [59] M. Singhal e G. Saini, “Optimization of Antenna Parameters Using Artificial Neural Network: A Review”, *International Journal of Computer Trends and Technology*, vol. 44, nº 2, p. 64–73, fev. 2017.
- [60] B. Mukherjee, “A novel sierpinski carpet fractal based photonic band gap structure for THz and optical communication applications”, in *2015 2nd International Conference on Signal Processing and Integrated Networks (SPIN)*, Noida, Delhi-NCR, India, 2015, p. 228–231.
- [61] N. Mohammedi, S. Zaiter, e R. Oussaid, “Theoretical study of PBG materials as substrates to enhance antenna performance”, apresentado em: 2014 International Conference on Multimedia Computing and Systems (ICMCS), Marrakech, 2014, pp. 1285-1290.
- [62] Krishnananda, K. R. Avinash e T. S. Rukmini, “Design and performance analysis of EBG antenna for wireless applications”, in *2011 IEEE Applied Electromagnetics Conference (AEMC)*, Kolkata, India, 2011, p. 1–4.
- [63] R. Gupta e M. Kumar, “Bandwidth Improvement of Patch Antennas with Electromagnetic Bandgap (EBG) Structures by Using Square Shaped Unit Cells in Circular Pattern”, in *2013 5th International Conference and Computational Intelligence and Communication Networks*, Mathura, India, 2013, p. 14–17.
- [64] C. J. Almeida e C. L. Sobrinho, “Influence of a PBG Structure on the Bandwidth of a Microstrip Antenna”, *IEEE Latin America Transactions*, vol. 2, nº 1, p. 25–30, mar. 2004.

- [65] C. Silva, L. Araujo, A. Oliveira, e M. Melo, “Uma Antena Multibanda para Comunicação Wireless”, in *MOMAG 2012 - 15º SBMO – Simpósio Brasileiro de Micro-ondas e Optoeletrônica e o 10º CBMag – Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo*, João Pessoa, 2012.
- [66] M. J. Ammann, M. John, Z. N. Chen, J. A. Evans, e J. C. Modro, “Reduction of ground-plane-dependent effects on microstrip-fed printed rectangular monopoles”, *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, vol. 2, nº 1, p. 42–47, fev. 2008.
- [67] M. T. Hagan e M. B. Menhaj, “Training feedforward networks with the Marquardt algorithm”, *IEEE Transactions on Neural Networks*, vol. 5, nº 6, p. 989–993, nov. 1994.
- [68] S. S. Haykin, *Neural Networks: A Comprehensive Foundation*. Prentice Hall, 1999.
- [69] B. O. Andrade, E. E. Oliveira, e L. M. Mendonça, “Técnicas de Baixo Custo Para o Desenvolvimento de Antenas de Microfita com PBG”, in *18 SBMO - Simpósio Brasileiro de Microondas e Optoeletrônica e 13 CBMAG - Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo*, Santa Rita do Sapucaí - MG, 2018, p. 230–234.
- [70] “UOL Economia”. [Online]. Disponível em: <https://economia.uol.com.br/widgets/conversor-moedas/index.jhtm?first=conversor&show=conversor>. [Acessado: 03-abr-2018].
- [71] PedroMenezes.com, “Valor da cotação do ouro hoje. Preço do grama do ouro sempre atualizado”, *Ouro Hoje: Cotação, Valor e Preço do Grama!* [Online]. Disponível em: <https://dolarhoje.com/ouro-hoje/>. [Acessado: 18-abr-2018].
- [72] G. A. Vandenbosch e R. Gillard, “Benchmarking of Optimally Used Commercial Software Tools for Challenging Antenna Topologies: The 2012–2013 Run”, *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 55, nº 3, p. 281–292, jun. 2013.
- [73] B. O. Andrade e L. M. Mendonça, “A Quadri-band PBG Antenna Cross-shaped For Wireless Communications”, in *International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications-ICEAA 2018, Antennas and Propagation in Wireless Communications-IEEE-APWC 2018, International Workshop on Finite Elements For Microwave Engineering-FEM 2018 The 14th*, Cartagena das Índias, Colombia, 2018.
- [74] R. Garg, P. Bhartia, I. J. Bahl e A. Ittipiboon, *Microstrip Antenna Design Handbook*. Artech House, 2001.
- [75] B. O. Andrade e L. M. Mendonça, “Um novo arranjo de antenas patch de microfita fractal multibanda para comunicação sem fio”, in *Simpósio Brasileiro de Micro-ondas e Optoeletrônica ; Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo*, Curitiba, 2014, p. 627–632.
- [76] B. O. Andrade e L. M. Mendonça, “Frequency invariance, gain improvement, and fast design in 3D-printed photonic band gap antennas with quadratic holes”, *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 61, nº 10, p. 2295–2305, 2019.
- [77] “3D Fila - Filamentos ABS, PLA, PETG XT, Tritan HT, Flex e HIPS”. [Online]. Disponível em: <https://3dfila.com.br>. [Acessado: 31-jul-2018].
- [78] “Feed para VOID3D | Filamentos para impressão 3D em Natal/RN”. [Online]. Disponível em: <https://void3d.com.br/>. [Acessado: 31-jul-2018].