



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

**Antenas de Microfita sobre substrato dielétrico
organizado de forma quase periódica**

Thiago Esley de Lima Medeiros

Mossoró
2013

Thiago Esley de Lima Medeiros

**Antenas de Microfita sobre substrato dielétrico
organizado de forma quase periódica**

Orientador: Prof. Dr. Idalmir de Souza Queiroz Júnior

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Comunicação e Automação, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Sistemas de Comunicação e Automação.

Mossoró - RN
2013

Antenas de Microfita sobre substrato dielétrico organizado de forma quase periódica

Thiago Esley de Lima Medeiros

Dissertação de Mestrado aprovada em 22 de novembro de 2013 pela banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Dr. Idalmir de Souza Queiroz Júnior (orientador) UFERSA

Prof. Dr. Humberto Dionísio de Andrade (co-orientador) UFERSA

Prof. Dr. Humberto César Chaves Fernandes UFRN

Prof. Dr. Roberto Ranniere Cavalcante de França UFPB

Agradecimentos

A Deus, por me dar forças para alcançar mais essa grande vitória em minha vida.

A minha esposa, Ticiane, pelo amor, incentivo, compreensão e apoio em todos os momentos dessa difícil jornada e ao meu filho Tawan.

Agradeço a meus pais pelo amor que sempre me dedicaram durante todos os momentos da minha vida

Aos professores Drs Idalmir de Souza Queiroz, Humberto Dionísio de Andrade e Augusto Carlos Pavão a compreensão, amizade e orientações.

Aos meus amigos e companheiros do grupo TECFOTON em especial ao professor Dr. Humberto César Chaves Fernandes, por sempre me apoiarem e me orientarem na busca do que eu queria.

Aos meus amigos, que estiveram sempre ao meu lado me incentivando e apoiando.

A todos aqueles que de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho.

Resumo

As antenas de microfita estão em constante evidência nas pesquisas atuais, devido às suas inúmeras vantagens. A geometria fractal proposta por Mandelbrot (1975) aliada ao bom desempenho e comodidade das estruturas planares são uma excelente combinação utilizada no projeto de antenas com o intuito de reduzir suas dimensões e realçar sua largura de banda, além de permitir o surgimento de melhores bandas de frequência em consequência da propriedade da auto-similaridade. Em comparação com as antenas em microfita convencionais, as antenas tipo patch com substratos fractais apresentam frequência de ressonância inferiores, possibilitando a fabricação de antenas ainda mais compactas. O objetivo desse trabalho consiste no projeto de antenas patch com substrato dielétrico organizado de forma quase periódica por meio da utilização da geometria fractal da sequência de Cantor aplicada a uma antena de patch circular alimentada por linha de microfita, projetada para uma frequência ressonância de 10 GHz. É feita análise dessa antena de microfita em vários tipos de substratos dielétricos por simulação através do *software* comercial *Ansoft Designer-HFSS*, usado para análise precisa do comportamento eletromagnético das antenas através do método dos elementos finitos apresentando resultados de frequência de ressonância, diagrama de radiação, carta de Smith e de campos elétricos e magnéticos fazendo-se comparações com outros resultados obtidos na literatura. Esta dissertação ainda apresenta um estudo bibliográfico em teorias de antenas, abordando também a respeito da geometria fractal, dando ênfase a suas características e propriedades como também a sua aplicabilidade. Este trabalho ainda apresenta um estudo sobre as estruturas quase periódicas e seu formalismo matemático.

Palavras-chave: Antenas de Microfita, Fractais, Estruturas Quase Periódicas, Sequência de Cantor.

Abstract

The microstrip antennas are in constant evidence in current research due to its numerous advantages. Fractal geometry proposed by Mandelbrot(1975) combined with the performance and convenience of planar structures are an excellent combination used in the design of antennas in order to reduce the dimensions and enhance its bandwidth, and allows the emergence of best bands frequency by virtue of ownership of high -similarity. Compared with the conventional microstrip antennas, patch antennas with fractal type substrates have lower resonance frequency, enabling the manufacture of even more compact antennas. The aim of this work consists of the design of patch antennas with dielectric substrates organized almost periodic basis through the use of fractal geometry sequence Cantor applied to a circular patch antenna fed by microstrip line, designed for a resonant frequency of 10 GHz. Analysis of this microstrip antenna is made in various types of dielectric substrates by simulation through *software* commercial *Ansoft HFSS - Designer*, used for accurate analysis of the electromagnetic behavior of the antennas by the finite element method by presenting results from resonant frequency and radiation pattern, making comparisons with other results in the literature. This dissertation also presents a bibliographic study on theories of antennas while also addressing about fractal geometry, emphasizing its characteristics and properties as well as its applicability. This paper also presents a study of almost periodic structures and their mathematical formalism considered throughout this work.

Keywords Microstrip antennas, Fractals, Almost Periodic Structures, Sequence Cantor.

Sumário

Sumário	i
Lista de Figuras	ii
Lista de Tabelas	iv
Lista de Símbolos	v
Lista de Abreviaturas	vii
1 Introdução	1
1.1 Organização do texto	3
2 Antena de Microfita	4
2.1 Introdução	4
2.2 Tipos	6
2.2.1 Patch	7
2.2.2 Plano de terra	9
2.3 Definições	10
2.3.1 Mecanismo de radiação	10
2.3.2 Polarização	11
2.3.3 Diretividade	13
2.3.4 Largura de Banda	13
2.4 Métodos de alimentação	14
2.4.1 Alimentação por linha de alta impedância	14
2.4.2 Alimentação por cabo coaxial (ponta de prova)	15
2.4.3 Alimentação por acoplamento por abertura	15
2.4.4 Alimentação por acoplamento por proximidade	16
2.5 Conclusões	17

3	Antenas de Microfita Circulares	18
3.1	Introdução	18
3.2	Campos Elétricos e Magnéticos - TM_z	19
3.3	Modelo da Cavidade para Antenas de Patch Circular	21
3.4	Diretividade e Impedância de Entrada em Antenas de patch circular	22
	3.4.1 Diretividade	22
	3.4.2 Impedância de entrada	22
3.5	Conclusões	23
4	Fractais e Estruturas quase-periódicas	24
4.1	Introdução	24
4.2	Geometria Fractais	25
4.3	Características e propriedades de um Fractal	26
	4.3.1 Estrutura Fina	28
	4.3.2 Complexidade Infinita	28
	4.3.3 Dimensão Fractal	29
	4.3.4 Auto-Similaridade	29
4.4	Estruturas periódicas e quase-periódicas	30
4.5	Formalismo matemático das sequências quase-periódicas	31
4.6	Sequência de Cantor	31
4.7	Conclusões	32
5	Substrato fractal organizado de forma quase periódica	33
5.1	Introdução	33
5.2	Estrutura em estudo	33
	5.2.1 Estrutura das antenas	34
5.3	Resultados	39
	5.3.1 Antena 1: de uma camada dielétrica com $\epsilon_r = 2,2$	40
	5.3.2 Antena 2: de três camadas dielétricas	42
	5.3.3 Antena 3: de sete camadas dielétricas	42
	5.3.4 Antena 4: de uma camada dielétrica com $\epsilon_r = 10$	45
5.4	Discussões	46
5.5	Conclusão	48
6	Considerações Finais	49
	Referências bibliográficas	51

Lista de Figuras

2.1	Antena patch alimentada por linha de microfita inset-fed.	7
2.2	Formas geométricas assumidas pelo patch irradiante.	8
2.3	Arranjos de antenas de microfita. (a) arranjo Franklin. (b) arranjo 6x6 retangular. (c) arranjo circular.	9
2.4	Mudança no padrão de irradiação devido à formação de arranjo. . . .	9
2.5	Diagramas de irradiação. (a) arranjo broadside. (b) arranjo end-fire. .	10
2.6	Comportamento das grandezas elétricas ao longo do patch.	11
2.7	Visualização dos campos de borda.	12
2.8	Onda eletromagnética - Campo elétrico \vec{E} e densidade de campo mag- nético \vec{B} oscilando em fase no vácuo.	12
2.9	Alimentação por linha de microfita.	15
2.10	Antena de microfita com patch retangular alimentada por ponta de prova coaxial.	16
2.11	Alimentação por acoplamento por abertura.	17
2.12	Alimentação por acoplamento por proximidade.	17
3.1	Antena tipo patch circular.	18
3.2	Geometria da Antena tipo patch circular.	21
4.1	Conjunto de Mandelbrot.	25
4.2	Fractais aleatórios.	26
4.3	Diferentes níveis para o conjunto de Cantor.	26
4.4	Diferentes níveis da curva de: (a) Koch e (b) Minkowski.	26
4.5	Níveis da curva de Peano.	27
4.6	Floco de neve Koch vista em uma escala maior.	27
4.7	Carpete de Sierpinski.	28
4.8	Ilustração esquemática das sequências de Cantor.	32
5.1	Estruturas básicas das antenas propostas nesta dissertação. (a) an- tena 1, b) antena 2, c) antena 3, d) antena 4).	34

5.2	Antena 1: Antena de microfita de patch circular de nível zero(a): vista superior da antena, b):vista lateral da antena.	35
5.3	Antena 2: Antena de microfita de patch circular e substrato fractado (a): vista superior da antena, b):vista lateral da antena.	37
5.4	Antena 3: Antena de microfita de patch circular e substrato fractado (a): vista superior da antena, b):vista lateral da antena.	38
5.5	Antena 4: Antena de microfita de patch circular (a): vista superior da antena, b):vista lateral da antena.	39
5.6	Resultados simulados da perda de retorno para a antena 1.	40
5.7	Carta de Smith para a antena 1, com ampliação dos respectivos pontos de ressonâncias.	41
5.8	Diagrama de radiação, em dB, da antena 1 simulado para a ressonân- cia de 8.7 GHz: a) Diagrama em 2D; b)Diagrama em 3D.	41
5.9	Resultados simulados da perda de retorno para a antena 2	42
5.10	Carta de Smith para a antena 2, com ampliação dos respectivos pontos de ressonâncias.	43
5.11	Diagrama de radiação, em dB, da antena 2 simulado para a ressonân- cia de 7.6 GHz: a) Diagrama em 2D; b)Diagrama em 3D.	43
5.12	Resultados simulados da perda de retorno para a antena 3	44
5.13	Carta de Smith para a antena 3, com ampliação dos respectivos pontos de ressonâncias.	44
5.14	Diagrama de radiação, em dB, da antena 3 simulado para a ressonân- cia de 6.8 GHz: a) Diagrama em 2D; b)Diagrama em 3D.	45
5.15	Resultados simulados da perda de retorno para a antena 4	45
5.16	Carta de Smith para a antena 4, com ampliação dos respectivos pontos de ressonâncias.	46
5.17	Diagrama de radiação, em dB, da antena 4 simulado para a ressonân- cia de 5.4 GHz: a) Diagrama em 2D; b)Diagrama em 3D.	46
5.18	Distribuição do campo elétrico: (a) antena 1, b) antena 2, c) antena 3, d) antena 4).	47
5.19	Distribuição do campo magnético: (a) antena 1, b) antena 2, c) antena 3, d) antena 4.	47

Lista de Tabelas

3.1	Raízes de χ_{mn}	20
5.1	Dimensões da antena 1.	36
5.2	Dimensões da antena 2.	36
5.3	Dimensões da antena 3.	36
5.4	Dimensões da antena 4.	40
5.5	Frequências de ressonâncias simuladas.	48
5.6	Larguras de banda simuladas.	48

Lista de Símbolos

h	Espessura do substrato
ϵ_r	Constante dielétrica efetiva
π	Número Pi
D	Dimensão fractal
a	Raio do Patch
lO	Comprimento da linha de alimentação do Patch
$X0$	Largura da linha de alimentação do Patch
v_0	Velocidade da luz no espaço livre
K_n	Número de segmentos do conjunto de Cantor
J_0	Função de Bessel de primeira espécie e ordem zero
l_n	Comprimento de cada segmento do conjunto de Cantor
N	Número de etapas para a formação do conjunto de Cantor
∞	Símbolo infinito
mm	Unidade de medida milímetro
fr_x	Frequência de ressonância dos resultados simulados
BW_x	Largura de banda dos resultados medidos
$2D$	Bidimensional
$3D$	Tridimensional
ϵ	Permissividade
v_0	Velocidade da luz no vácuo

Lista de Abreviaturas

<i>TEM</i>	<i>Transversal Eletromagnética</i>
<i>dB</i>	<i>Decibel</i>
<i>TM</i>	Magnético transversal
<i>FEM</i>	<i>Finite Elements Method</i>
<i>GHz</i>	<i>Gigahertz</i>
<i>HFSS</i>	<i>High Frequency Structure Simulator</i>

Capítulo 1

Introdução

A comunicação sem fio vem crescendo muito nos últimos anos. E para que continue crescendo é preciso o desenvolvimento de antenas de microfita cada vez mais compactas que operam em várias frequências simultaneamente e apresentam maiores largura de banda. Com o desenvolvimento das tecnologias de quarta geração (4G), busca-se soluções técnicas que atendam os requisitos de novos e melhores serviços, tais como: Serviços comerciais e os serviços voltado para área militar [1], [2], [3]. O aumento cada vez maior por dispositivos leves, compactos e com custo reduzido, tem chamado a atenção de pesquisadores da área de engenharia de Telecomunicações. Essas características tornam as estruturas planares multi-banda atrativas para aplicações em sistemas de comunicações móveis, comunicações por satélite e comunicações por radar [1], [3]. Várias técnicas para a redução ou compactação têm sido propostas e aplicadas a antenas patch em microfita, tais como: a utilização de substratos dielétricos de alta permissividade elétrica [4]; a aplicação de cargas resistivas ou reativas [5]; e o aumento do comprimento elétrico da antena por meio de otimização de sua geometria [6].

Nesse contexto, as antenas de microfita representam um papel fundamental, dada a sua aplicabilidade e versatilidade, fortalecendo assim essa área de pesquisa, pois até a segunda geração dos sistemas de comunicação móveis (2G), a atenção estava voltada ao desenvolvimento dos mais diversos protocolos e técnicas de modulação mais eficientes [7], [3].

Em comunicações móveis, mais precisamente em relação aos sistemas celulares, as estações necessitam de antenas com diagramas de radiação setoriais, visando um melhor aumento de capacidade e da utilização dos canais. Estas características podem ser obtidas a partir da construção de arranjos de antenas de microfita.

As estruturas fractais, são alternativas interessantes para projetos de estruturas planares de tamanho reduzido e que apresentam ressonância multi-banda (*dual*

band, tri band, quad band). Essas estruturas apresentam duas características principais, que são responsáveis pelo tamanho reduzido, o baixo perfil, o comportamento multi-banda e banda larga envolvendo estruturas com geometria fractal, são elas. A propriedade de preenchimento do espaço e a propriedade de auto-similaridade [8], [9]. O telefone celular modo *dual band* é um bom exemplo de dispositivo sem fio multi-frequência. Essa operação *dual band* para o caso do GSM, envolve transmissão e recepção em 850 MHz e 1850 MHz. Antenas tradicionais são incapazes de conseguir tal comportamento multi-banda, sendo assim técnicas alternativas são necessárias. Recentes pesquisas em teoria de antenas têm aplicado a geometria fractal em projetos de antenas, resultando em novas antenas fractais com múltiplas ressonâncias. A aplicação da geometria fractal em estruturas de antenas convencionais otimiza a forma da antena com a finalidade de aumentar seu comprimento elétrico, consequentemente reduzindo todo o seu tamanho [10]

A análise de problemas dos mais diversos projetos de dispositivos em sistemas de comunicação, foram solucionados com a ajuda de ferramentas computacionais. Os softwares que simulam dispositivos de antenas de microfita são baseados no método dos elementos finitos. Diante de tal fato e constatada a eficiência dessas ferramentas, toda simulação dos resultados é investigada através de simulações realizadas pelo *software* comercial *Ansoft Designer-HFSS*, usado para análise precisa do comportamento eletromagnético das antenas e servem como motivação para a realização desse trabalho.

O objetivo desse trabalho consiste no projeto de antenas patch com substratos dielétrico organizado de forma quase periódica por meio da utilização da geometria fractal da sequência de Cantor aplicada a uma antena de patch circular alimentada por linha de microfita, projetada para uma frequência de ressonância de 10 Ghz [11]. Toda simulação dos resultados é investigada através de simulações realizadas pelo *software* comercial *Ansoft Designer-HFSS*, usado para análise precisa do comportamento eletromagnético das antenas. Nessa dissertação ainda apresenta um estudo bibliográfico em teorias de antenas, estudo também a respeito da geometria fractal, dando ênfase a suas características e propriedades como também a sua aplicabilidade em projetos de antenas de microfita. Este trabalho ainda apresenta um estudo sobre as estruturas quase periódicas e seu formalismo matemático.

1.1 Organização do texto

Este trabalho encontra-se distribuído em 5 capítulos, buscando-se evidenciar todo o referencial teórico e bibliográfico para o estudo das estruturas em questão, em seguida, apresenta-se uma análise dos resultados obtidos na caracterização das novas antenas com substratos fractados.

O Capítulo 2 apresenta um estudo bibliográfico a respeito de teoria de antenas de microfita, situando-a no contexto histórico de evolução, evidenciando suas características, vantagens e desvantagens em relação às antenas de microondas convencionais, além das técnicas de alimentação e os métodos gerais de análise.

O Capítulo 3 apresenta um estudo bibliográfico mais específico na teoria de antenas de microfita de patch circular, antena de estudo desse trabalho, evidenciando suas características e os métodos gerais de análise.

O Capítulo 4 faz referência ao estudo da geometria fractal e estruturas quase periódicas, situando-a no contexto histórico de evolução, evidenciando suas características, as mais diversas formas fractais existentes, bem como os métodos de construção e geração dessas formas, além do formalismo matemático das sequências quase periódicas.

No Capítulo 5 são apresentados os resultados obtidos de quatro antenas tipo patch circular sendo duas com substratos fractados, simulação em software. Parâmetros como, frequência de ressonância, perda de retorno, carta de Smith, diagrama de radiação e os campos elétricos e magnéticos dessas antenas são investigados.

Capítulo 2

Antena de Microfita

Este capítulo apresenta um estudo bibliográfico a respeito de teoria de antenas de microfita. O conceito de antenas de microfita, suas vantagens e desvantagens. Também serão abordados os tipos de antenas de microfita, o conceito de patch, plano de terra, definições dos mecanismos de radiação, polarização, diretividade e largura de banda, bem como as técnicas de alimentação e o método de análise utilizado.

2.1 Introdução

Devido ao avanço das tecnologias, aliada a construção cada vez mais sofisticada de circuitos integrados de microondas, resulta-se em um maior estudo envolvendo antenas patch. As primeiras publicações a respeito de antenas patch ocorreram na década de 50 com Deschamps [12] durante o III Simpósio sobre antenas, patrocinado pela Força Aérea Americana nos Estados Unidos e com Gutton e Baissinot na França [7], [3].

A seguir, houve um aumento nos trabalhos que descreviam os aspectos importantes sobre o comportamento de antenas planares [13], [14], dentre eles, o artigo Munson [15], sobre foguetes e mísseis, demonstrando a praticidade dessas antenas. Em 1977, Lo et al [16] publicou a primeira análise matemática de uma ampla variedade de patches de microfita. No final da década de 70, tais antenas se difundiram por diversos sistemas de comunicação e, desde então, têm havido um interesse crescente por novos meios de utilizá-las.

Essas estruturas apresentam algumas características importantes, tais como [3], [7];

- Baixo custo;
- Leveza;

- Tamanho reduzido;
- adaptabilidade a superfícies curvas;
- largura de banda estreita;
- baixa eficiência de radiação
- compatibilidade com circuitos integrados;
- radiação em apenas 1 hemisférios
- transmissão em ondas médias e longas.

Os aspectos anteriores não devem ser subentendidos como eventuais vantagens ou desvantagens, uma vez que essa capacidade de definição é reservada apenas às aplicações desejadas.

As antenas de microfita apresentam particularidades geométricas e propriedades elétricas que podem ser interpretadas como vantagens ou desvantagens, dependendo das aplicações a que se destinam. O modelamento da antena de microfita está relacionado às características da estrutura, tais como o tipo de substrato, dimensões e geometria do patch. Diversos são os métodos de análise relatados na literatura para a caracterização das antenas de microfita [17]. Esses métodos podem ser divididos em dois grupos [18]. No primeiro grupo, os métodos são baseados na distribuição de corrente elétrica no patch condutor e o plano terra. Alguns desses métodos numéricos para análise de antenas de microfita são [19]:

- Método dos Momentos (MoM);
- Métodos dos elementos finitos (FEM);
- Diferenças finitas no domínio do tempo (FDTD);

No segundo grupo, os métodos são baseados na distribuição de corrente magnética equivalente ao redor das margens do patch, também fenômenos como a propagação de ondas de superfície e a dispersão não são relevantes ao estudo, podendo assim ser desconsiderado. Dentre os diversos modelos aproximados, destacam-se:

- O modelo da linha de transmissão (TLM);
- Modelo de rede multiporta (MNM);

O modelo da linha de transmissão possibilita a determinação de diversos parâmetros da antena, tais como a frequência de ressonância, o diagrama de radiação e impedância de entrada. Embora seja um dos métodos mais simples e menos exato, esse método produz resultados satisfatórios e uma facilidade em estabelecer o casamento de impedância da estrutura, bastando para isso controlar o comprimento do inset-fed associado ao projeto da antena. Esse modelo é adequado para análise de antenas de microfita com patch retangular ou quadrado. Comparado ao modelo da linha de transmissão o modelo da cavidade é mais exato e ao mesmo tempo mais complexo.

Para outras geometrias do patch, torna-se inviável a análise através deste modelo. Nessa análise, o elemento radiante pode ser modelado por duas aberturas paralelas, dessa forma, representando dipolos magnéticos. O modelo da cavidade, a princípio, pode ser empregado para o estudo de antenas com patches de qualquer geometria. Entretanto, o modelamento matemático para patches retangulares é bastante simplificado em relação à análise de patches com outros formatos.

O modelo da cavidade basicamente trata a antena como uma cavidade, circundada por paredes elétricas, no topo e na base, e por paredes magnéticas nos contornos laterais. Os campos nas antenas são considerados como os campos da cavidade, sendo expandidos em termos de modos ressonantes na cavidade, cada um com sua frequência de ressonância. Os modelos aproximados são satisfatoriamente precisos até determinados valores de frequência. À medida que a frequência aumenta, a precisão desses modelos é reduzida, tornando-se inaceitável para a faixa de frequências correspondente às ondas milimétricas.

2.2 Tipos

Apesar das antenas de microfita terem surgido a mais de meio século [20], [21], esses dispositivos apenas começaram a ganhar alguma atenção nos anos 70. As antenas de microfita são constituídas basicamente por um condutor irradiante ou patch, impresso sobre uma camada metálica em uma de suas faces e um plano de terra na outra extremidade, separado por um material dielétrico. Antenas de microfita, como a mostrada na figura 2.1, consistem de uma superfície metálica bem fina ($t \ll \lambda_0$ é o comprimento de onda no espaço livre na frequência de operação e t a espessura da antena metálica) assentada sobre um substrato dielétrico de pequena espessura ($h \ll \lambda_0$, geralmente $0,003\lambda_0 \leq h \leq 0,05\lambda_0$) sobre um plano de terra. A antena de microfita é desenvolvida para que sua irradiação máxima seja normal a

sua superfície. Isto pode ser alcançado através de uma escolha apropriada do modo de excitação (configuração do campo) embaixo da antena.

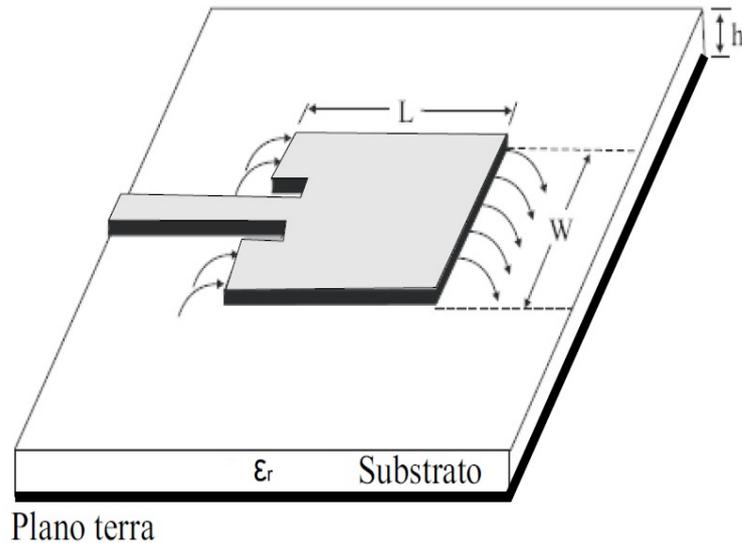


Figura 2.1: Antena patch alimentada por linha de microfita inset-fed.

Frequentemente as antenas de microfita são denominadas, também, como antenas patch. O elemento irradiante da antena de microfita pode ser quadrado, retangular, em forma de fita (dipolo), circular, elíptico, triangular e mais recente as formas fractais. A forma que é mais encontrada e usada é a do tipo retangular. A figura 2.2 mostra algumas das formas geométricas utilizadas.

2.2.1 Patch

O patch é uma lâmina metálica normalmente condutora, embora haja situações em que esse metal atue como supercondutor, [22]. O metal normalmente utilizado em sua composição é o cobre mas, em aplicações como ondas milimétricas, utiliza-se ouro, devido à sua maior condutividade elétrica [23]. Ele é considerado o elemento irradiador das antenas de microfita e, possui uma espessura muito pequena quando comparada ao comprimento de onda no espaço livre.

Quanto à sua forma, o patch influencia na distribuição de corrente e, consequentemente, no perfil do campo da superfície da antena. Podendo apresentar formato geométrico regular ou irregular, como no caso dos fractais, mas é comum trabalhar com as formas regulares — retangular e circular, devido à sua maior facilidade de análise.

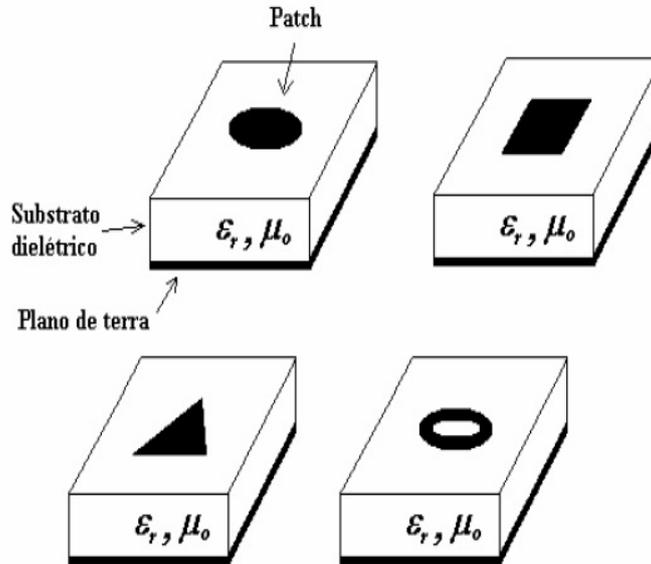


Figura 2.2: Formas geométricas assumidas pelo patch irradiante.

Além disso, esses elementos podem ser combinados entre si, compondo novas estruturas, conhecidas como arranjos de microfita (Figura 2.3) [3]. Por meio deles, pode-se aumentar a largura de banda da antena [3], [24] e, principalmente, atribuir-lhe características de diretividade impossíveis de se alcançar com um único elemento [15]. A Figura 2.4 ilustra essa situação.

Cada arranjo é capaz de compor diversos diagramas de radiação, baseando-se no espaçamento entre seus elementos, em sua quantidade e no modo com que são distribuídos na antena. Ajustando esses parâmetros, pode-se obter duas formas principais de irradiação: broadside (Figura 2.5(a)) e end-fire (Figura 2.5(b)) [22]. No primeiro caso, os componentes são dispostos de forma que a irradiação ocorra perpendicularmente ao plano da antena. No segundo, o objetivo é que isso aconteça em uma direção tangencial.

Nesse sentido, o patch normalmente é projetado para assumir um comportamento broadside mas, devido à baixa eficiência das antenas de microfita, grande parte da potência termina sendo usada na formação de lóbulos secundários — laterais e traseiro, em direções totalmente indesejadas. Um dos fatores que mais contribuem para isso é a radiação espúria associada à polarização cruzada [23].

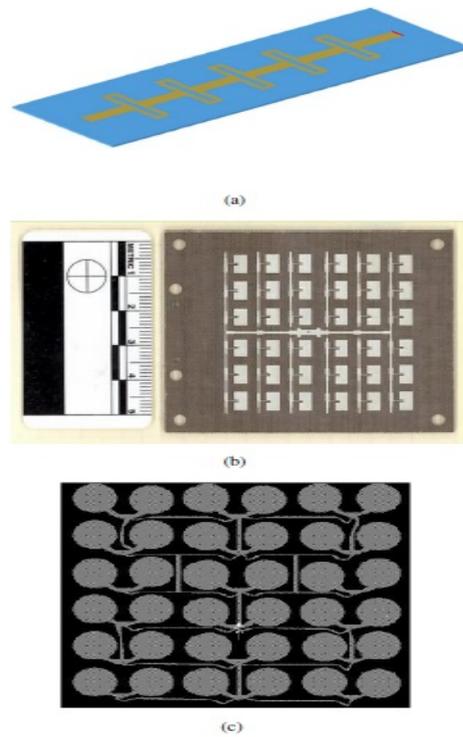


Figura 2.3: Arranjos de antenas de microfita. (a) arranjo Franklin. (b) arranjo 6x6 retangular. (c) arranjo circular.

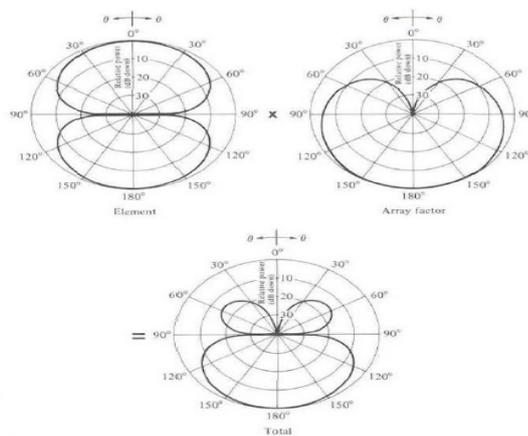


Figura 2.4: Mudança no padrão de irradiação devido à formação de arranjo.

2.2.2 Plano de terra

De modo semelhante ao patch, também é composto por uma fita metálica, situada na face inferior do substrato da antena tendo uma função refletora, evitando a

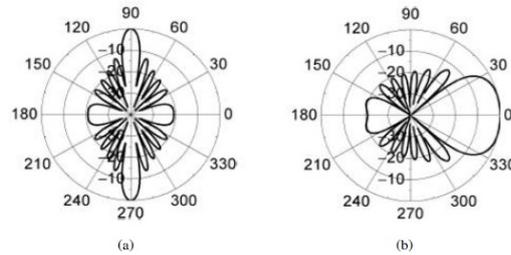


Figura 2.5: Diagramas de irradiação. (a) arranjo broadside. (b) arranjo end-fire.

formação de um lóbulo traseiro mais forte, além de servir como um mecanismo de aterramento — de onde tem esse nome. O plano de terra é muitas vezes teoricamente definido como infinito, para facilidade de cálculo. Na prática, usa-se um plano um pouco maior do que os limites do substrato para simular essa característica.

Modificações nesse elemento têm dado bons resultados. O plano de terra truncado é uma técnica capaz de aumentar a banda das antenas [3]. Contudo, ao fazer isso, ele insere mais descontinuidades na microfita, acarretando o aumento das ondas superficiais. Uma possibilidade mais vantajosa aumentar a banda é a inclinação do plano de terra, que têm-se mostrado eficiente, dada sua capacidade de se adaptar a novos ângulos de inclinação sem a necessidade de reprojeter a antena (ou filtro) [25].

2.3 Definições

2.3.1 Mecanismo de radiação

O mecanismo de radiação das antenas de microfita está intimamente relacionado a um fenômeno conhecido como campos de borda. Esse é um efeito eletromagnético que resulta no desvio do ponto de ressonância, simulando uma antena de comprimento superior ao seu valor físico real.

Considere a visão lateral de uma antena de microfita com patch quadrado, alimentada por ponta de prova. Suas extremidades representam descontinuidades na microfita e podem ser vistas como pontos de circuito aberto; assim, a impedância nas bordas do patch tende ao infinito (na prática, são valores da ordem de 300 W) e a corrente é aproximadamente nula. Logo, considerando o elemento irradiador com um comprimento igual a $l=2$ mm, a distribuição das grandezas elétricas é a representada na Figura 2.6.

Pode-se, então, inferir que tensão e corrente estão defasadas. Há um valor máximo de tensão, por exemplo, no início do patch e um respectivo máximo negativo em sua outra extremidade. No centro essa tensão é nula, assim como seu campo elétrico. Por essa razão, em patch comuns como retangulares ou circulares, a alimentação da antena, quando por ponta de prova, jamais deve ser colocada em seu centro radiante.

Assim, esse comportamento leva à formação do campo elétrico com o efeito de borda, mostrado na Figura 2.7.

Os campos próximos à superfície do patch estão todos alinhados em uma mesma direção, logo se somam em fase e produzem a radiação da antena de microfita. Efeito semelhante ocorre com a corrente; entretanto, há uma corrente igual de direção oposta, circulando pelo plano de terra, que cancela a radiação.

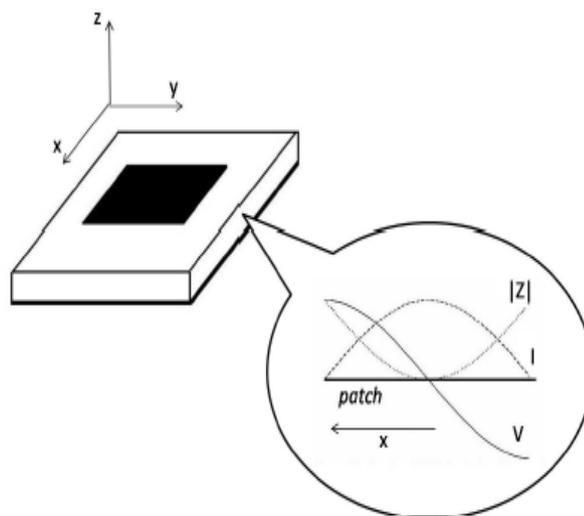


Figura 2.6: Comportamento das grandezas elétricas ao longo do patch.

2.3.2 Polarização

A polarização de uma antena em uma dada direção é definida como a polarização da onda eletromagnética que por sua vez, pode ser definida como sendo o plano no qual se encontra a componente elétrica (ou magnética) desta onda. Nesse trabalho será definido dois tipos de polarização a linear e circular.

Uma onda harmônica no tempo tem polarização linear se em qualquer ponto do espaço o vetor campo elétrico ou magnético é orientado ao longo da mesma linha

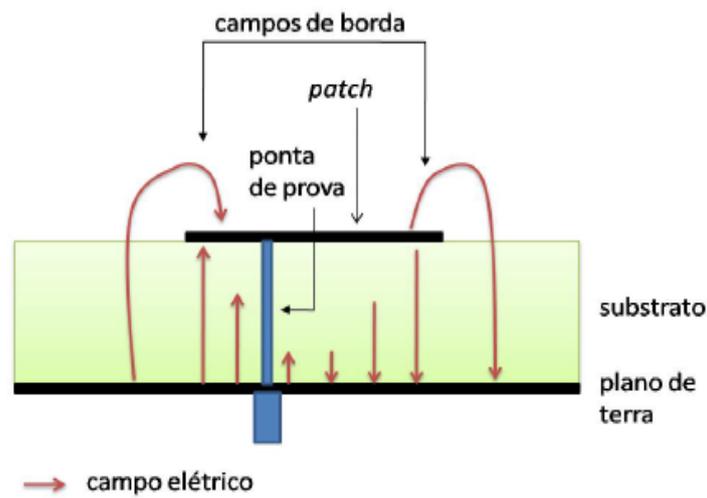


Figura 2.7: Visualização dos campos de borda.

reta em qualquer instante de tempo, como mostrado na Figura 2.8.

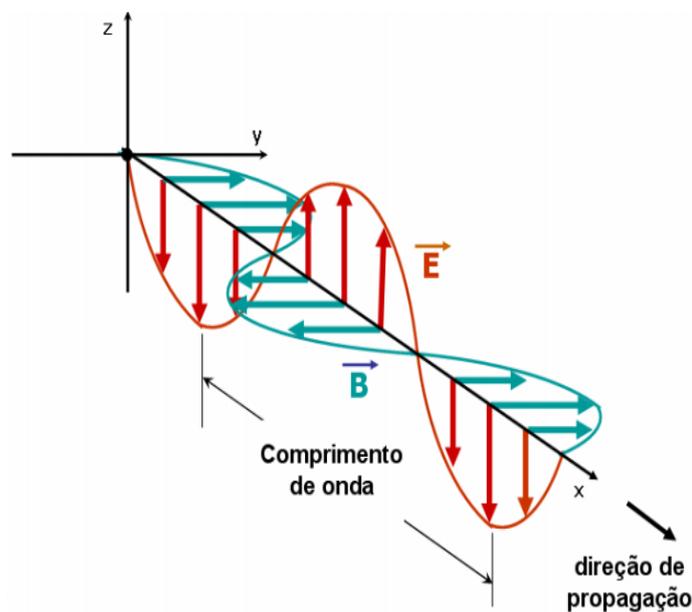


Figura 2.8: Onda eletromagnética - Campo elétrico \vec{E} e densidade de campo magnético \vec{B} oscilando em fase no vácuo.

No caso da polarização circular, uma onda harmônica no tempo é circularmente polarizada se o vetor campo elétrico ou magnético em qualquer ponto do espaço traça um círculo em função do tempo. A antena de microfita é a antena mais usada para gerar polarização circular. Várias formas de patch são capazes de gerar este

tipo de polarização, tais como: quadrado, circular, pentagonal, triangular e elíptico, porém as formas circulares e quadradas são mais usadas na prática [3].

2.3.3 Diretividade

A diretividade é uma medida das propriedades direcionais de uma antena comparada às características de uma antena isotrópica. Sendo a antena isotrópica a base para o cálculo da diretividade, ela possui a distribuição de energia no espaço mais uniforme possível levando assim a uma diretividade unitária [7]. A diretividade é definida como sendo a razão entre a intensidade de radiação em uma dada direção da antena e a intensidade de radiação média sobre todas as direções [3].

Se a direção não for especificada, a direção de intensidade máxima de radiação (máxima diretividade) é expressa por:

$$D_{max} = D_0 = \frac{U_{max}}{U_0} = \frac{4\pi U_{max}}{P_{rad}} \quad (2.1)$$

Onde

D = diretividade

D_0 = Diretividade máxima

U_{max} = Intensidade máxima de radiação

U_0 = Intensidade de radiação de uma fonte isotrópica

P_{rad} = Potência total radiada

2.3.4 Largura de Banda

A largura de banda de uma antena é definida para informar sobre a faixa de frequências, em torno da frequência central de operação desta, de acordo com determinadas características, tais como: impedância de entrada, diagrama de irradiação, largura de feixe, polarização e ganho [3].

Para antenas de banda larga, a largura de banda é expressa como a relação entre a frequência maior e a frequência menor, tendo como referência a frequência central de operação da antena. Por exemplo, uma largura de banda de 10:1 indica que a frequência superior é 10 vezes maior que a frequência inferior. Sendo representada pela expressão:

$$BW = \frac{f_2}{f_1} \quad (2.2)$$

Onde

f_1 = Frequência inferior

f_2 = Frequência superior da faixa

A largura de banda é expressa também pelo posicionamento f_1 e f_2 , quando f_2 for maior ou igual ao dobro da frequência inferior f_1 :

$$BW = \frac{f_2 - f_1}{f_0} \quad (2.3)$$

Onde

f_0 = Frequência de operação

2.4 Métodos de alimentação

As antenas de microfita podem ser alimentadas por inúmeras técnicas e a seleção do método de alimentação leva em conta certos objetivos, tais como [3], [26]:

- Uma linha de alta impedância;
- por cabo coaxial (ponta de prova);
- acoplamento por abertura;
- acoplamento por proximidade;

Nas próximas seções será feita uma breve explanação sobre estes tipos de alimentação.

2.4.1 Alimentação por linha de alta impedância

A estrutura da linha de microfita se constitui numa fita condutora impressa sobre o mesmo plano do substrato, apoiado sobre o plano de terra. Isto permite que a estrutura da antena permaneça totalmente planar, o que a torna adequada em aplicações de circuitos integrados de micro-ondas. Neste tipo de alimentação, obtém-se melhor casamento de impedância, uma vez que pode-se ajustar a impedância ajustando o alimentador. Quando este tipo de alimentação é utilizado em substratos com espessuras maiores, ocorre um aumento na largura de banda da antena, porém, aumentam-se as radiações indesejadas na alimentação [1], [27], [28]. A Figura 2.9 exemplifica a alimentação através de linha de microfita. Esse é o tipo de alimentação utilizado nesse trabalho

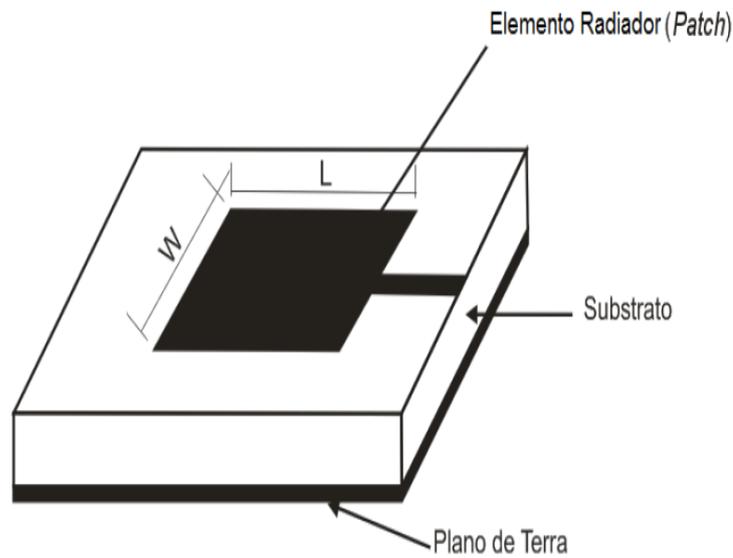


Figura 2.9: Alimentação por linha de microfita.

2.4.2 Alimentação por cabo coaxial (ponta de prova)

Na alimentação por cabo coaxial, o vivo da ponta de prova atravessa o substrato e é conectado ao elemento radiador, enquanto que o conector externo é fixado ao plano de terra. Esse esquema está representado na Figura 2.10.

Essa alimentação tem a vantagem de simplicidade de projeto, através do posicionamento do ponto de alimentação para o ajuste do nível da impedância de entrada. Por outro lado, tem largura de banda estreita, semelhante ao primeiro caso, e para a construção de arranjos exige um grande número de junções de solda, o que torna sua fabricação difícil e compromete seu desempenho. Para substratos mais espessos, pontas de prova mais largas são necessárias. Isso constitui um problema, pois gera um aumento na radiação espúria e na potência das ondas de superfície.

2.4.3 Alimentação por acoplamento por abertura

Os métodos anteriores usam uma conexão direta, física, entre as estruturas, gerando modos de ordens superiores, os quais produzem radiação de polarização cruzada. Para suplantarmos esse problema, adotaram-se técnicas de alimentação indireta, como o uso do acoplamento.

No acoplamento por abertura (Figura 2.11) são basicamente usados três substratos, dois deles separados por um plano de terra. Na face inferior do substrato

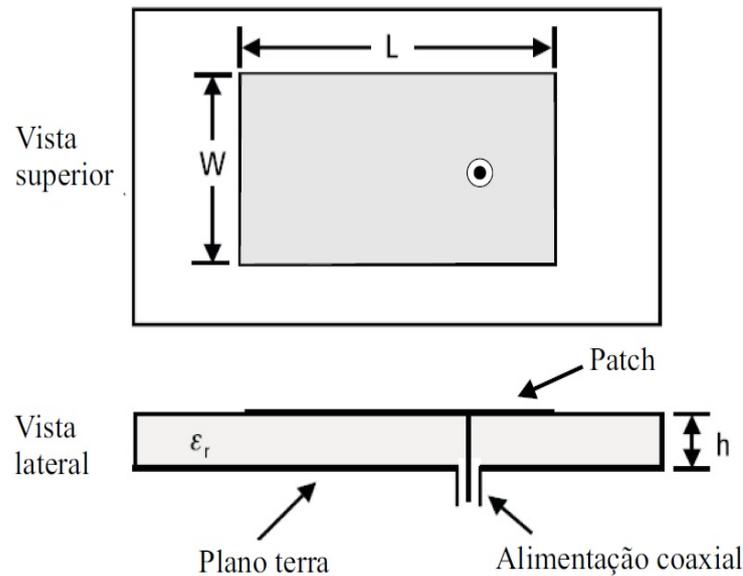


Figura 2.10: Antena de microfita com patch retangular alimentada por ponta de prova coaxial.

intermediário há uma linha de microfita, cuja energia se acopla ao patch por meio de uma fenda existente no plano de terra superior. Normalmente, o substrato médio é composto por um material que apresenta alta constante dielétrica (ϵ_r). O dielétrico superior é mais espesso e possui um baixo (ϵ_r). Já o substrato inferior possui um plano de terra em sua base, que serve apenas para auxiliar no confinamento de energia do sistema. O isolamento entre a fonte e o radiador minimiza a radiação espúria e garante pureza de polarização. As desvantagens desse método são sua estreita largura de banda e difícil fabricação.

2.4.4 Alimentação por acoplamento por proximidade

Essa técnica assemelha-se à do acoplamento por abertura; contudo, não existe uma fenda no plano de terra. A linha de microfita é inserida entre dois substratos e acopla-se ao patch, situado na face superior da estrutura, atravessando, assim, um dos substratos. Dentre os quatro métodos aqui descritos, o de acoplamento por proximidade (Figura 2.12) apresenta a maior largura de banda, aliada a uma modelagem simples e a uma baixa radiação espúria [3]. Sua grande dificuldade está na montagem da estrutura.

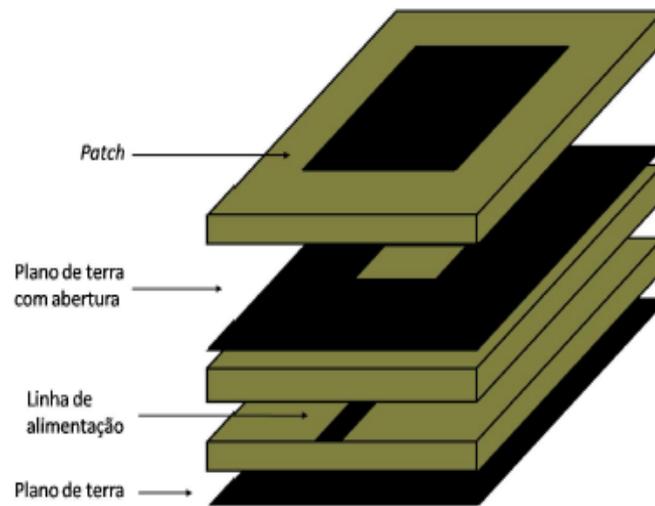


Figura 2.11: Alimentação por acoplamento por abertura.

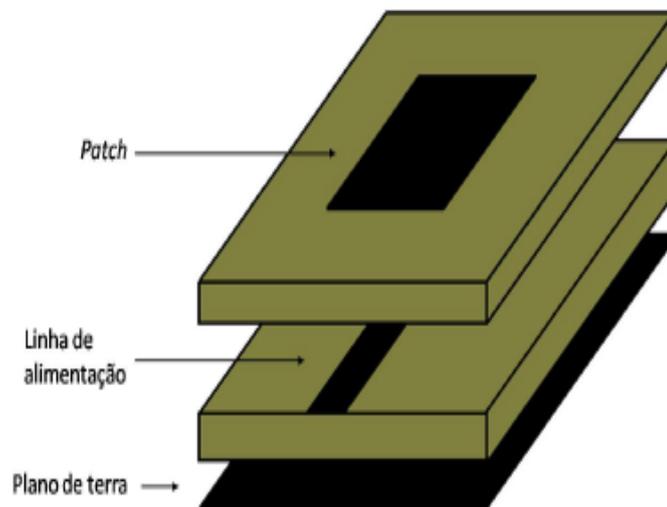


Figura 2.12: Alimentação por acoplamento por proximidade.

2.5 Conclusões

Nesse capítulo foram apresentados conceitos e grandezas essenciais ao entendimento dos temas que serão abordados nos capítulos seguintes, situando assim, acerca do trabalho desenvolvido.

Capítulo 3

Antenas de Microfita Circulares

3.1 Introdução

Uma configuração menos popular que a antena de microfita de patch retangular é a de patch circular, mostrado na figura 3.1.

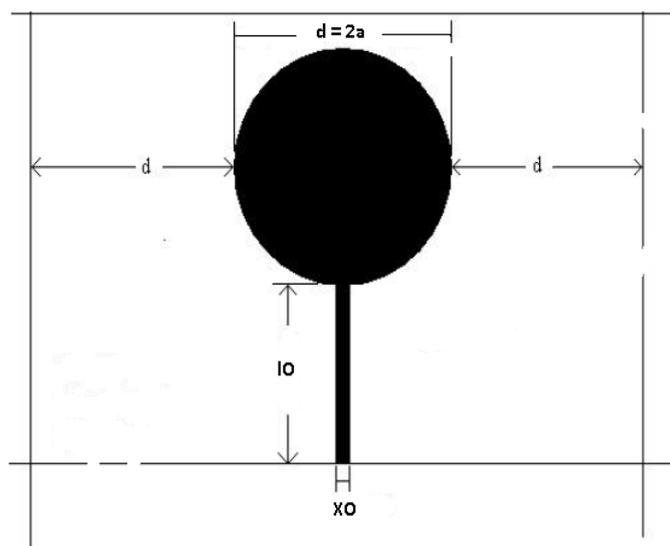


Figura 3.1: Antena tipo patch circular.

A montagem de uma antena de microfita circular segue as mesmas regras da retangular, entretanto, o seu raio "a" é a principal dimensão a ser determinada.

Os modos que os patch circulares apresentam podem ser encontrados tratando o patch, o plano terra e o substrato como uma cavidade circular. Assim como no patch retangular, os modos TM_z são os suportados pela antena com patch circular cuja altura do substrato é muito pequena, onde z é tomado como a direção perpendicular ao patch. Para as antenas de patch retangular há dois graus de liberdade

(comprimento e largura). Contudo, para o patch circular há apenas um grau de liberdade, que é o raio do patch.

Pode-se analisar o comportamento das componentes de campo para uma antena de microfita com patch circular utilizando-se vários métodos: o método da onda completa, o modelo de cavidade ou o método do elemento finito [3].

3.2 Campos Elétricos e Magnéticos - TM_z

Para encontrar o campo dentro da cavidade, é utilizado o vetor potencial de aproximação. Para TM_z é calculado o vetor potencial magnético A_z , na qual em coordenadas cilíndricas apresenta bons resultados, a equação de onda homogênea de [3];

$$\nabla^2 A_z(\rho, \phi, z) + k^2 A_z(\rho, \phi, z) = 0 \quad (3.1)$$

Pode ser mostrado que, para todos os mods TM_z , onde os campos magnéticos e elétricos estão relacionadas com o vetor potencial A_z ;

$$E_\rho = -j \frac{1}{\omega \mu \epsilon} \frac{\partial^2 A_z}{\partial \rho \partial z} \quad (3.2)$$

$$E_\phi = -j \frac{1}{\omega \mu \epsilon} \frac{1}{\rho} \frac{\partial^2 A_z}{\partial \phi \partial z} \quad (3.3)$$

$$E_z = -j \frac{1}{\omega \mu \epsilon} \left(\frac{\partial^2}{\partial z^2} + k^2 \right) A_z \quad (3.4)$$

$$H_\rho = \frac{1}{\mu} \frac{1}{\rho} \frac{\partial A_z}{\partial \phi} \quad (3.5)$$

$$H_z = 0 \quad (3.6)$$

Com as condições de contorno de

$$E_\rho(0 \leq \rho' \leq a, 0 \leq \phi' \leq 2\pi, z' = 0) = 0 \quad (3.7)$$

$$E_\rho(0 \leq \rho' \leq a, 0 \leq \phi' \leq 2\pi, z' = h) = 0 \quad (3.8)$$

$$H_\phi(\rho' = a, 0 \leq \phi' \leq 2\pi, 0 \leq z' \leq h) = 0 \quad (3.9)$$

O vetor do potencial magnético A_z resulta em;

$$A_z = B_{mnp} J_m(k_p \rho') [A_2 \cos(m\phi') + B_2 \sin(m\phi')] \cos(k_z z') \quad (3.10)$$

com a equação de restrição

$$(k_p)^2 + (k_z)^2 = k_r^2 = \omega_r \mu \epsilon \quad (3.11)$$

As coordenadas cilíndricas ρ', ϕ', z' são usadas para representar os campos dentro da cavidade, enquanto que $J_m(x)$ é a função de Bessel de primeiro tipo de ordem m [3];

$$k_p = \frac{\chi'_{mn}}{a} \quad (3.12)$$

$$k_z = \frac{p\pi}{h} \quad (3.13)$$

$$m = 0, 1, 2, \dots \quad (3.14)$$

$$n = 0, 1, 2, \dots \quad (3.15)$$

$$p = 0, 1, 2, \dots \quad (3.16)$$

A expressão χ_{mn} é uma raiz da derivada da função de Bessel de ordem n e m o número da raiz. Os valores de χ_{mn} para alguns valores de n estão listados na Tabela 2.1. Para qualquer raio dado, o modo correspondente a $n = 1$ possui a mais baixa frequência de ressonância, sendo, portanto, o modo dominante.

Tabela 3.1: Raízes de χ_{mn}

n	χ_{nm}
1	1,84118
2	3,05424
0	3,83171
3	4,20119

3.3 Modelo da Cavidade para Antenas de Patch Circular

Dentre as varias técnicas de projeto para elementos de antenas de microfita, um modelo simples e útil na predição das características de radiação, é o modelo da cavidade.

No modelo utilizado por Derneryd [29], as frequências de ressonância são obtidas em função do raio (a) do patch, da espessura (d) do substrato dielétrico e da constante dielétrica (ϵ_r). Entretanto, um raio efetivo (a_e), ligeiramente maior do que o físico, é introduzido devido ao efeito da borda do ressoador. A relação entre o raio efetivo e o raio físico é dada por [3]:

$$(a)_e = a \left[1 + \frac{2d}{\pi a \epsilon_r} \left(\ln \frac{\pi a}{2d} + 1,7726 \right) \right]^{1/2} \quad (3.17)$$

Essa expressão é encontrada considerando uma distribuição de campo quase estática. Nessa aproximação, considera-se que a espessura do substrato é muito menor que o comprimento de onda no mesmo, sendo válida para frequências situadas na faixa inferior de microondas. Entretanto, também pode ser usada para estimar as frequências de ressonância de ordens mais altas.

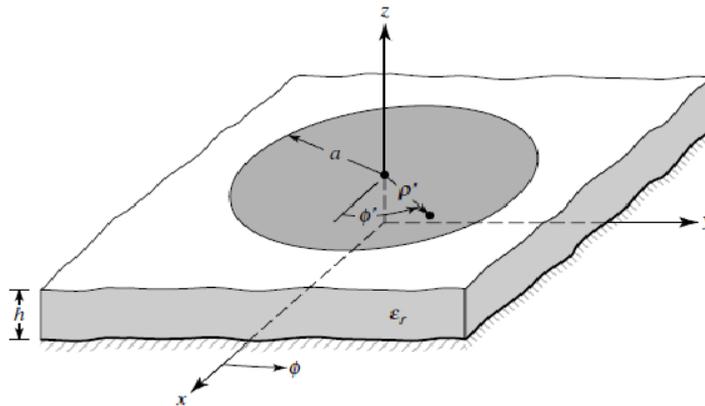


Figura 3.2: Geometria da Antena tipo patch circular.

Assim, para cada modo TM de propagação, a frequência de ressonância é calculada a partir de [3];

$$(f_r)_{mm0} = \frac{1}{2\pi\sqrt{\mu\epsilon}} \left(\frac{\chi'_{mn}}{a} \right) \quad (3.18)$$

3.4 Diretividade e Impedância de Entrada em Antenas de patch circular

3.4.1 Diretividade

A potência irradiada do patch circular pode ser calculada usando as equações definidas no modelo da cavidade, que com base no modelo pode ser expresso como:

$$P_{rad} = |V_0|^2 \frac{(k_0 a_e)^2}{960} \int_0^{\pi/2} [J_{02}'^2 + \cos^2 \theta J_{02}'^2] \sin \theta d\theta \quad (3.19)$$

Baseada nas equações do modelo da cavidade, a diretividade para a abertura em $\theta = 0^\circ$ pode ser expressa como:

$$D_0 = \frac{(k_0 a_e)^2}{120 G_{rad}} \quad (3.20)$$

3.4.2 Impedância de entrada

A resistência de entrada de uma antena de patch circular é real. A potência de entrada é independente da posição do ponto de alimentação ao longo da circunferência. Tendo uma referência de alimentação em $\theta = 0^\circ$, a resistência de entrada a qualquer distância radial $\rho' = \rho_0$ a partir do centro do patch, para o modo dominante TM, Pode ser escrita como [3].

$$R_{in}(\rho' = \rho_0) = \frac{1}{G_1} \frac{J_1^2(k\rho_0)}{J_1^2(ka_e)} \quad (3.21)$$

$$G_t = G_{rad} + G_c + G_d \quad (3.22)$$

Onde G_t é a condutância total da radiação, condução (ohmic) e as perdas dielétricas. A resistência de entrada da antena de patch circular pode ser escrita como [3].

$$R_{in}(\rho' = \rho_0) = R_{in}(\rho' = a_e) \frac{1}{G_1} \frac{J_1^2(k\rho_0)}{J_1^2(ka_e)} \quad (3.23)$$

$$R_{in}(\rho' = a_e) = \frac{1}{G_t} \quad (3.24)$$

3.5 Conclusões

Nesse capítulo foram apresentados conceitos e grandezas essenciais ao entendimento dos temas que serão abordados nos capítulos seguintes, situando assim, acerca do trabalho desenvolvido.

Capítulo 4

Fractais e Estruturas quase-periódicas

4.1 Introdução

Em 1872, o cientista Karl Weierstrass encontrou um exemplo de uma função com propriedade de ser contínua em todo o seu domínio, mas em nenhuma parte diferenciável. Anos depois, o gráfico dessa função foi denominado fractal [30]. No ano de 1905, o matemático francês Pierre Fatou, descobriu que algumas equações formadas por números complexos poderiam ser representadas por figuras que apresentavam auto-similaridade em diferentes escalas. Durante anos foram realizados inúmeros trabalhos relacionados aos fractais, mas essa linha de pesquisa começou a se desenvolver mais rapidamente por volta de 1980 com o avanço da informática que viabilizou a geração de novos objetos fractais e suas representações [30], [27].

O termo fractal surgiu em 1975, empregado pelo matemático polonês Benoit Mandelbrot, que foi responsável pela criação de um dos fractais mais conhecidos – o conjunto de Mandelbrot, como ilustra a figura 4.1. Esse termo é de origem latina que advém do adjetivo *fractus* e deriva do verbo *frangere* – que significa quebrar, fracionar [17], [31]. A geometria fractal é considerada um ramo da matemática que surgiu da necessidade de estudar as propriedades dos fractais e descrever as formas geométricas encontradas na natureza as quais não eram descritas pela geometria tradicional ou geometria euclidiana [30].

Um fractal pode ser definido como um objeto que apresenta invariância na sua forma à medida que a escala analisada é alterada, mantendo sua estrutura idêntica à original, o que é possibilitado pela quantidade infinita de detalhes que possuem, sendo por isso, considerados auto-similares e independentes de escala [27].

Dentre os fractais mais conhecidos estão o conjunto de Cantor, o triângulo de

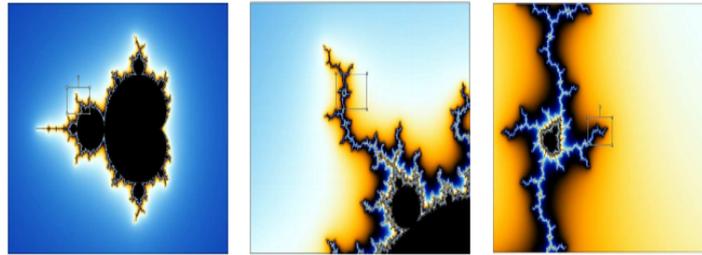


Figura 4.1: Conjunto de Mandelbrot.

Sierpinski, a curva de Peano, o floco de neve de Koch, a esponja de Menger, o conjunto de Julia, o conjunto de Mandelbrot, entre outros. A aplicabilidade desses fractais abrange muitas áreas do conhecimento, tais como, a biologia, geografia, medicina, música, economia, análise de imagens por satélites, na tecnologia e arte gerada por computadores, entre outros [30].

4.2 Geometria Fractais

Fractais são estruturas diferentes das que se costuma observar na natureza, em que governa a geometria euclidiana. Um fractal é uma forma geométrica áspera, rúde ou fragmentada, que pode ser subdividida em partes, em que cada pedaço dessa subdivisão é uma cópia exata do todo. Ele é gerado a partir de uma fórmula matemática, muitas vezes simples, mas que aplicada de forma iterativa, produz resultados fascinantes e impressionantes. Existem duas categorias de fractais: os geométricos, que repetem continuamente um modelo aleatório, que são construídos por meio de comunicação (Figura 4.2) e os modelos padrão (Figura 4.3), que são construídos a partir de uma teoria matemática [10], [33], [11], [32].

Os Fractais são formas geométricas abstratas de uma forma diferente, com padrões complexos que se repetem infinitamente, mesmo limitados a uma área infinita. Representam funções reais ou complexas. Mandelbrot, constatou ainda que todas estas formas e padrões possuíam algumas características comuns (auto-semelhança, dimensão e complexidade infinita) e que havia uma curiosa e interessante relação entre estes objetos e aqueles encontrados na natureza. Ele mostrou que existem muitos fractais na natureza e estes por sua vez, são capazes de modelar com exatidão certos fenômenos. Há ainda muitas outras estruturas matemáticas que são consideradas fractais, algumas das estruturas mais conhecidas são mostradas nas respectivas Figuras 4.4 - 4.6.

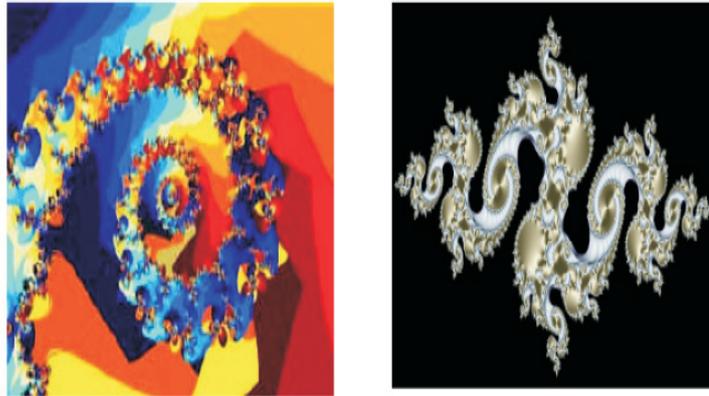


Figura 4.2: Fractais aleatórios.

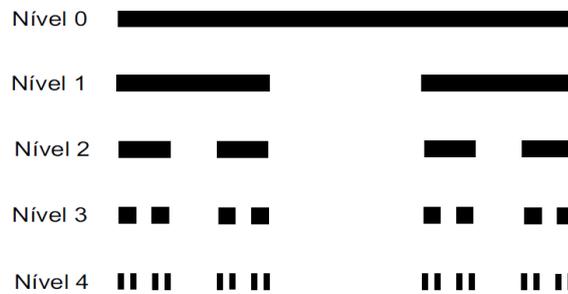


Figura 4.3: Diferentes níveis para o conjunto de Cantor.

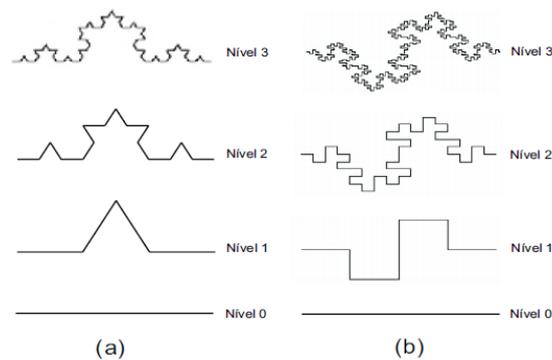


Figura 4.4: Diferentes níveis da curva de: (a) Koch e (b) Minkowski.

4.3 Características e propriedades de um Fractal

A principal característica de um fractal é a auto-similaridade ou auto-semelhança, com as quais se pode obter réplicas menores da figura através de sua divisão (no caso da geometria fractal, de sua ampliação). A exemplo, todas as formas geométricas

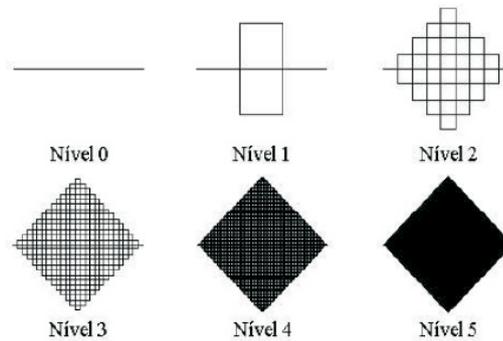


Figura 4.5: Níveis da curva de Peano.

ortodoxas, perdem as suas estruturas quando são ampliadas ou diminuídas. Um círculo numa escala muito maior não é nada mais do que um segmento de reta [17].

Existem dois tipos de auto-semelhança: auto-semelhança exata e auto-semelhança estatística. Os Fractais que possuem auto-semelhança exata são gerados a partir de reproduções exatas de si mesmo em menor escala, conforme ilustra a Figura 4.6. Apesar dessas características especiais, estes objetos fractais não permitam escrever inteira ou adequadamente as formas existentes na natureza [10], [33], [11], [32]. Os elementos encontrados na natureza raramente exibem auto-semelhança exata, mais quase sempre apresentem a chamada auto-semelhança estatística, na qual se aplicam totalmente os mesmos conceitos e definições. Esta classe recebe a denominação de fractais não-determinísticos e diferem dos anteriores por incluir um certo grau de aleatoriedade no cálculo de novos pontos. Essas e outras características serão brevemente estudadas nos tópicos a seguir

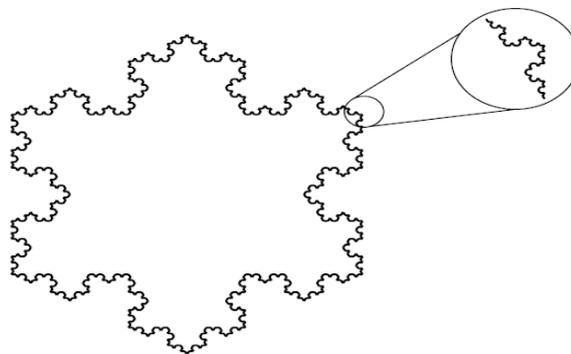


Figura 4.6: Floco de neve Koch vista em uma escala maior.

4.3.1 Estrutura Fina

Esta característica revela a infinita quantidade de detalhes que um fractal pode apresentar. A riqueza de detalhes dos fractais pode ser observada mesmo quando ocorrem sucessivas ampliações. Ao contrário do que ocorre com as figuras geométricas convencionais, como uma circunferência ou uma senoide, que vão perdendo suas características originais à medida que se amplia a escala de observação, nos fractais quanto mais ampliações vão ocorrendo mais detalhes são revelados, mesmo que o processo se repita indefinidamente [30]. Esta característica pode ser observada na figura 4.6, que representa a ampliação de um trecho da curva de Koch, onde pode ser visto que os detalhes de parte da curva são idênticos a quaisquer outros, independentemente do grau de ampliação.

4.3.2 Complexidade Infinita

A complexidade infinita é uma característica dos fractais que indica a quantidade infinita de detalhes que possuem, e por isso não poderão ser representados completamente. Esta característica existe devido ao fato de que o processo que gera os fractais é recursivo, ou seja, tem um número infinito de iterações. Quanto maior o número de iterações do processo de geração dos fractais, mais detalhes serão apresentados e assim não se conseguirá representar completamente um objeto fractal, por isso essa característica é assim denominada. Pode-se observar essa característica no carpete ou tapete de Sierpinski ilustrada na figura 4.7.

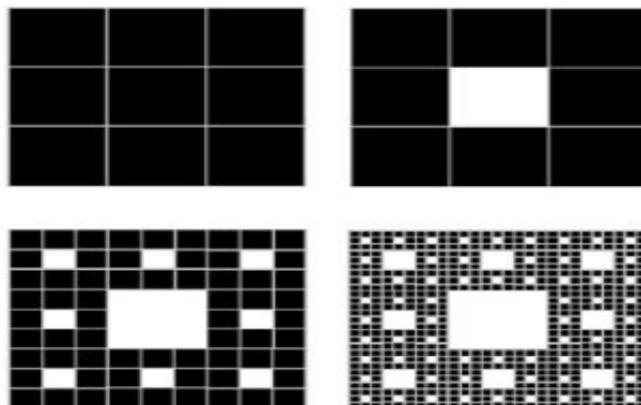


Figura 4.7: Carpete de Sierpinski.

4.3.3 Dimensão Fractal

De acordo com a geometria euclidiana, as figuras geométricas convencionais possuem dimensões inteiras, ou seja, de zero a três [34], as quais são denominadas dimensões topológicas. De acordo com a geometria euclidiana um ponto tem dimensão zero, uma linha tem dimensão um, quadrados e triângulos têm dimensão dois, os objetos sólidos como uma esfera e um cubo têm dimensões três. Entretanto, essa geometria não abrange os objetos complexos encontrados na natureza, como por exemplo, os formatos das árvores, das montanhas, das raízes e ramos de árvores, da couve-flor, o comportamento dos batimentos cardíacos, entre outros. A existência de diversas formas irregulares não era considerada pela geometria euclidiana, pois esses objetos não tinham definição de forma e dimensão [35], [30], [33].

Diante da necessidade de descrever esses objetos de formas irregulares surgiu a geometria fractal. Ao contrário do que ocorre na geometria euclidiana, a geometria fractal considera além da dimensão topológica, a dimensão fractal dos elementos irregulares – que se trata de uma quantidade, não necessariamente fracionária, a qual representa o espaço ocupado por um elemento fractal, ou seja, refere-se à dimensão espacial desse elemento. Entretanto, a dimensão fracionária é uma característica apresentada apenas por elementos fractais.

4.3.4 Auto-Similaridade

A auto-similaridade consiste no processo de obtenção de réplicas menores do fractal original através de sua ampliação. A semelhança entre as réplicas obtidas pode ser observada em qualquer nível da construção do fractal, percebendo que uma parte do fractal se assemelha a parte maior, ou até mesmo com o fractal inteiro [23]. Quando as réplicas obtidas apresentam características sempre idênticas diz-se que o fractal possui auto-similaridade estrita. Os fractais apresentam dois tipos de auto-similaridade, quais sejam:

- Auto-similaridade exata: nesse caso, os fractais apresentam cópias idênticas de si mesmos em diferentes escalas de observação. Essa característica pode ser observada, geralmente, em fractais gerados por funções iterativas [34]. Um exemplo de fractal que apresenta auto-similaridade exata é o floco de neve de Koch como pode ser visto na figura 4.6.
- Auto-similaridade Estatística: este tipo de auto-similaridade é o menos evidente de todos. Nesse caso, o fractal possui medidas numéricas ou estatísticas

que são preservadas em diferentes escalas. Os fractais aleatórios podem ser citados como exemplos de fractais que apresentam a auto-similaridade estatística, embora não sejam exatamente, nem quase auto-similares [25].

4.4 Estruturas periódicas e quase-periódicas

Em um trabalho de 1984, Schechtman e colaboradores [36] mostraram a existência de um sólido metálico que exibia um padrão de difração de um cristal monocristalino, mas com simetria icosaédrica, inconsistente com as translações da rede cristalina conhecidas para um cristal. Estudos teóricos desenvolvidos por Levine e Steinhardt [37] explicaram esta simetria mediante as figuras geométricas de Penrose em 2D e 3D [38], que preenchem todo o espaço, mas que são aperiódicas, ou seja, não exibem uma estrutura periódica regular. O desafio colocado pelos estudos experimentais foi desenvolver modelos teóricos para caracterizar estas estruturas artificiais.

Este novo sólido cristalino, sem periodicidade translacional, foi denominado de quase-cristal, quasicristal ou cristal aperiódico. Embora o termo quasicristal seja mais apropriado quando aplicado aos compostos naturais ou as ligas artificiais, em 1D, não há diferenças entre este e as estruturas quase periódicas formadas pelo arranjo incomensurável de células unitárias periódicas. Uma motivação para o estudo destas estruturas é que elas exibem um espectro de energia fragmentado semelhante ao conjunto de Cantor [39], revelando um padrão de auto-similaridade, que é uma característica fundamental em sistemas fractais. Outro aspecto fascinante é devido as propriedades coletivas nestes sistemas, como as correlações de longo alcance que são observadas em quasicristais e que também estão presentes em sistemas quase periódicos, fornecendo uma nova descrição de desordem [40], tema bastante investigado em física estatística.

Neste contexto, os trabalhos pioneiros de Merlin e colaboradores em sistemas quase periódicos para a sequência de Fibonacci e a sequência de Thue-Morse [41] em super-redes nanoestruturadas têm gerado uma atividade de pesquisa expressiva no campo dos quasicristais. Basicamente, estes sistemas envolvem a definição de dois blocos constituintes (A e B, por exemplo), cada um deles contendo a informação física necessária, ordenados segundo uma determinada sequência. Isto é, eles podem ser descritos em termos de uma série de gerações que obedecem a uma relação recursiva particular. Além disso, eles podem ser considerados como sistemas intermediários entre os cristais periódicos e os sólidos amorfos [42], sendo um dos

aspectos que tornam estes materiais interessantes para estudo.

4.5 Formalismo matemático das sequências quase-periódicas

As estruturas quase periódicas consideradas ao longo deste trabalho são conhecidas como sequências substitucionais, as quais têm sido estudadas em muitas áreas da matemática [43], da ciência da computação e da criptografia [44]. Apesar de utilizar conceitos elementares, a abordagem a ser apresentada produziu resultados de bastante interesse na matemática e na física. Seguem então algumas definições importantes quanto à quase periodicidade das sequências de substituição.

Definição 1: *Um conjunto finito ξ , cujos elementos são $\xi = A, B$, (com A e B sendo dois blocos constituintes diferentes), que denominamos de alfabeto.*

Definição 2: *Chamamos de ξ^* o conjunto de todas as palavras de comprimento finito (tal como $AABAB$) que podem ser escritas a partir do alfabeto.*

Definição 3: *Definimos como ξ como uma quantidade que age sobre uma palavra, substituindo cada letra (por exemplo, A) desta palavra por uma imagem correspondente, chamada de $\xi(A)$.*

Uma sequência é então denominada de sequência substitucional se ela é um ponto fixo de ξ , isto é, se ela permanece invariante quando cada letra na sequência é substituída por sua imagem em ξ . As sequências substitucionais mais interessantes e que têm atraído a atenção dos físicos são:

- a) A sequência de Cantor, onde as regras de substituição são $A \rightarrow \xi(A) = ABA$, $B \rightarrow \xi(B) = BBB$;
- b) A sequência de Fibonacci, onde $A \rightarrow \xi(A) = AB$, $B \rightarrow \xi(B) = A$;
- c) A sequência de Thue-Morse, onde $A \rightarrow \xi(A) = AB$, $B \rightarrow \xi(B) = BA$;
- d) E a sequência de período duplo, onde $A \rightarrow \xi(A) = AB$, $B \rightarrow \xi(B) = AA$;

A sequência substitucional que foi utilizada nesse trabalho foi a sequência de Cantor, por ser a mais simples e mais conhecida.

4.6 Sequência de Cantor

Provavelmente a mais conhecida e simples geometria fractal determinística é a triádica sequência de Cantor [11]. Esse conjunto é obtido através da repetição de uma regra simples: dividir qualquer segmento em três partes iguais, e em seguida, eliminar

a central (processo chamado de sequência de Cantor inicial), e com isso repetir este processo continuamente. Por exemplo, se começarmos algebricamente com o conjunto fechado $S_0 = [0, 3]$ de todos os números de 0 a 3 e retira-se o terço central aberto, ficamos com um par de intervalos fechados $[0, 1]$ e $[2, 3]$ representando S_1 . Os terços médio abertos em cada um destes intervalos seria removido novamente para produzir quatro intervalos menores representando S_2 , e assim por diante. Depois de diversas etapas, teríamos um grande número de pequenos intervalos, separados por intervalos de vários tamanhos.

Para aplicações em blocos de construção de estruturas de multicamada, é mais apropriado considerar em vez disso a chamada sequência de Cantor de saída. Isto tem sua n -ésima fase definida em termos da fase anterior pelo $S_n = S_{n-1}B_nS_{n-1}$, com as condições iniciais considerando $S_0 = A$ e $S_1 = AB_1A$. Nesse caso B_n para uma sequência n -ésima fase difere da base $B_1 (\equiv B)$ para a primeira fase só pela sua espessura, $d_{B_n} = 3^{n-1}d_{B_1}$. Podemos também construir uma sequência mais direta usando as transformações $A \rightarrow ABA$, $B \rightarrow BBB$ [45].

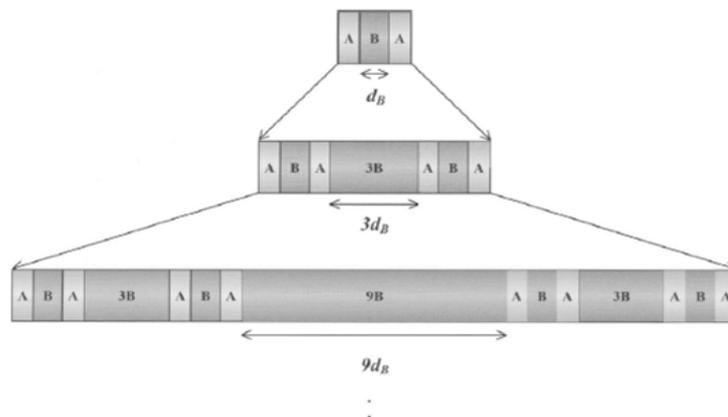


Figura 4.8: Ilustração esquemática das sequência de Cantor.

4.7 Conclusões

Nesse capítulo foram apresentados conceitos e grandezas essenciais ao entendimento da geometria fractal, sua características e propriedades, como também o conceito de estruturas quase periódicas e o formalismo matemático de suas sequências, situando assim, acerca do trabalho desenvolvido.

Capítulo 5

Substrato fractal organizado de forma quase periódica

5.1 Introdução

Neste capítulo serão apresentados os resultados que foram obtidos com base nos conceitos básicos citados nos capítulos anteriores. São descritos os procedimentos adotados no projeto e simulação, bem como a análise dos resultados obtidos. As simulações das antenas foram realizadas com o auxílio do software Ansoft HFSSTM, que é uma ferramenta de análise que emprega o Método dos elementos finitos e analisa estruturas de altas frequências para a resolução dos campos eletromagnéticos associados [46]. São apresentadas comparações entre os resultados simulados com outros resultados obtidos nas literaturas, a fim de validá-los. Para cada tipo de substrato fractado das antenas projetadas, são apresentados a frequência de ressonância, os diagramas de radiação, as Cartas de Smith simuladas e os campos elétricos e magnéticos ao longo do Patch e da antena.

5.2 Estrutura em estudo

Foram projetadas quatro antenas do tipo patch circular sendo duas com substratos dielétricos fractais conforme figura 5.1. O projeto inicial baseou-se na antena 1 onde foi utilizado como material dielétrico RT/duroid 5880, com 0,1588 cm de espessura (h) e permissividade relativa (ϵ_r) de 2,2. A alimentação das antenas é feita por linha de microfita. Para melhor entendimento, o projeto da antena será detalhado nas subseções seguintes.

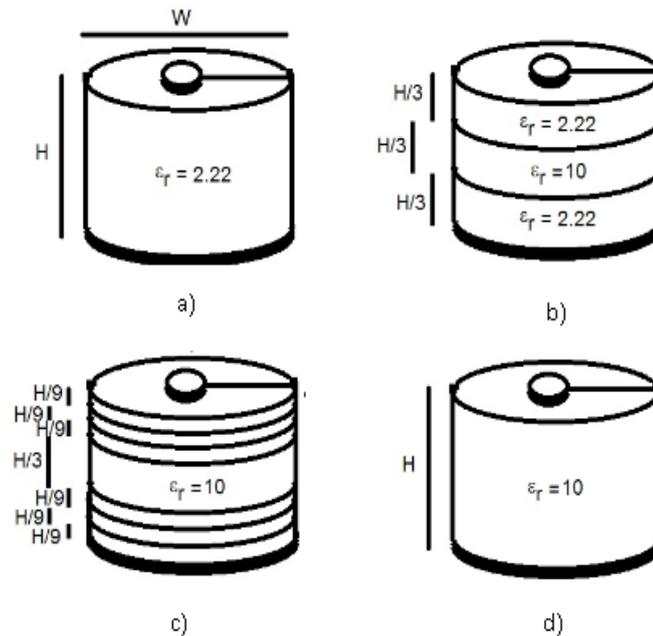


Figura 5.1: Estruturas básicas das antenas propostas nesta dissertação. (a) antena 1, b) antena 2, c) antena 3, d) antena 4).

5.2.1 Estrutura das antenas

A figura 5.1 ilustra as estruturas básicas das antenas propostas nesta dissertação. Trata-se de antenas de patch circulares compostas de substratos normais (sem fractalização - antena de substrato 1 e 4), e substratos fractalizados (antenas de substratos 2 e 3), correspondentes a sequência de Cantor que foram obtidos a partir do substrato 1.

A primeira antena figura 5.1 a) trata-se de um patch circular construído para ressoar na frequência de 10 GHz, de raio (a) , alimentado por uma linha de microfita de comprimento (L_0) e largura (X_0) , com material dielétrico RT/duroid 5880, de 0,1588 cm de espessura (h) e permissividade relativa (ϵ_r) de 2,2 [3]. Este elemento corresponde à antena de nível zero, cujos parâmetros são mostrados na figura 5.2 e seus respectivos valores são apresentados na tabela 5.1. É importante acrescentar que esta antena é usada como referência do livro Balanis [3], onde o mesmo usa o método aproximado das cavidades que mesmo com a correção do efeito de franja ainda é o método mais aproximado.

Em seguida, a segunda antena é obtida aplicando-se contornos fractais no substrato da antena 1. O tipo de contorno utilizado para a geração dos níveis fractais no substrato foi a sequência de cantor, a qual pode ser obtida aplicando-se os seguintes

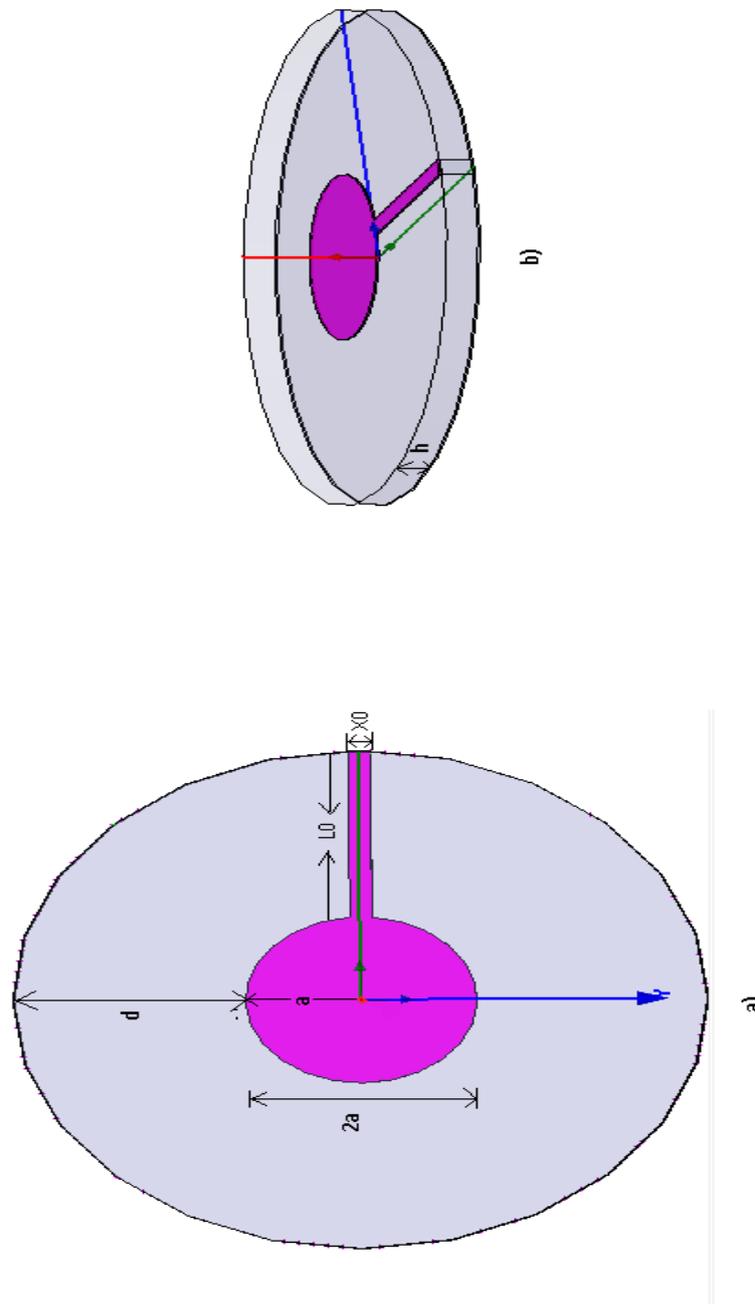


Figura 5.2: Antena 1: Antena de microfita de patch circular de nível zero(a): vista superior da antena, b):vista lateral da antena.

fatores de iteração $S_n = S_{n-1}B_nS_{n-1}$ [30]. A permissividade (ϵ_r) para os níveis dos substratos da antena 2, são eles; substrato nível 1 $\epsilon_r = 2.2$, substrato nível 2 $\epsilon_r = 10$, substrato nível 3 $\epsilon_r = 2.2$. A figura 5.3 ilustra a antena 2 que é constituída pelo substrato da antena 1 fractado, o qual apresenta uma nova forma geométrica devido

Tabela 5.1: Dimensões da antena 1.

	Frequência (Ghz)	a (mm)	l0 (mm)	X0 (mm)	h (mm)	d (mm)
patch	10	5,25	20,75	1	0,1	-
substrato	10	-	-	-	1,588	20,75

aos contornos fractais aplicados ao seu substrato, mencionado anteriormente. Os valores das dimensões da antena 2 podem ser vistos na tabela 5.2.

Tabela 5.2: Dimensões da antena 2.

	Frequência (Ghz)	a (mm)	l0 (mm)	X0 (mm)	h (mm)	d (mm)
patch	10	5,25	20,75	1	0,1	-
substrato nível 1	10	-	-	-	0,529	20,75
substrato nível 2	10	-	-	-	0,529	20,75
substrato nível 3	10	-	-	-	0,529	20,75

A próxima etapa é construir o substrato da Antena 3, obtido com a aplicação dos contornos fractais da Sequência de Cantor nos substratos da antena 2. A permissividade (ϵ_r) para os níveis dos substratos da antena 3, são eles; substrato nível 1 $\epsilon_r= 2.2$, substrato nível 2 $\epsilon_r= 10$, substrato nível 3 $\epsilon_r= 2.2$, substrato nível 4 $\epsilon_r= 10$, substrato nível 5 $\epsilon_r= 2.2$, substrato nível 6 $\epsilon_r= 10$ e substrato nível 7 $\epsilon_r= 2.2$. A figura 5.4 ilustra a antena 3 que é constituída pelo substrato da antena 2 fractado, o qual apresenta novamente uma forma geométrica devido aos contornos fractais aplicados ao seu substrato, Os valores das dimensões da antena 3 podem ser vistos na tabela 5.3.

Tabela 5.3: Dimensões da antena 3.

	Frequência (Ghz)	a (mm)	l0 (mm)	X0 (mm)	h (mm)	d (mm)
patch	10	5,25	20,75	1	0,1	-
substrato nível 1	10	-	-	-	0,176	20,75
substrato nível 2	10	-	-	-	0,176	20,75
substrato nível 3	10	-	-	-	0,176	20,75
substrato nível 4	10	-	-	-	0,529	20,75
substrato nível 5	10	-	-	-	0,176	20,75
substrato nível 6	10	-	-	-	0,176	20,75
substrato nível 7	10	-	-	-	0,176	20,75

A próxima e ultima etapa é a construção da antena 4 a partir das dimensões dos substratos da antenas 3 e os mesmos fatores de interações citados anteriormente para obtenção das dimensões dos substratos. A permissividade (ϵ_r) para o único nível do

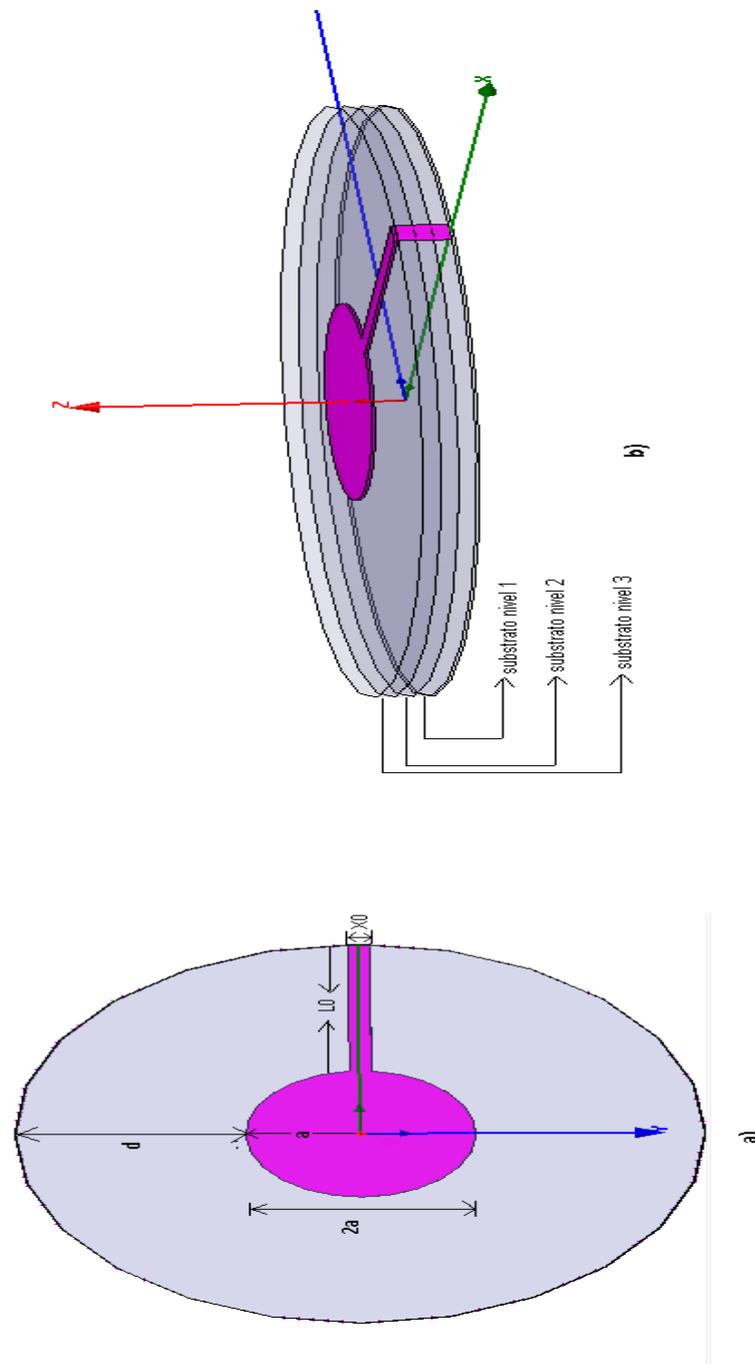


Figura 5.3: Antena 2: Antena de microfita de patch circular e substrato fractado (a): vista superior da antena, b):vista lateral da antena.

substrato da antena 4, é $\epsilon_r = 10$. A figura 5.4 ilustra a antena 4 que é constituída pelo substrato da antena 4 fractado, o qual também apresenta novamente uma forma geométrica devido aos contornos fractais aplicados ao seu substrato, Os valores das dimensões da antena 4 podem ser vistos na tabela 5.4.

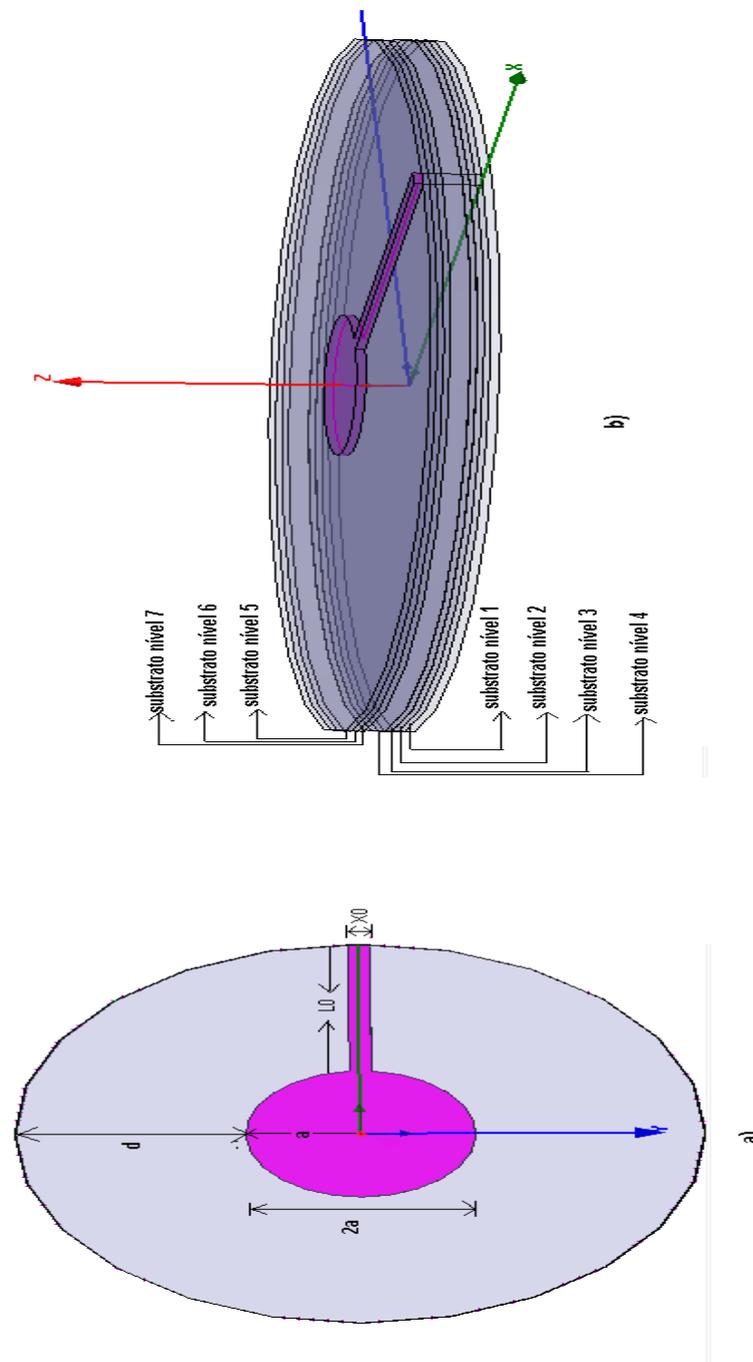


Figura 5.4: Antena 3: Antena de microfita de patch circular e substrato fractado (a): vista superior da antena, b):vista lateral da antena.

Determinadas as dimensões do patch e dos substratos, são iniciadas as simulações da antena projetada. Nesta etapa são analisadas as quatro antenas, com a finalidade de investigar os efeitos no comportamento da frequência das antenas em cada caso analisado.

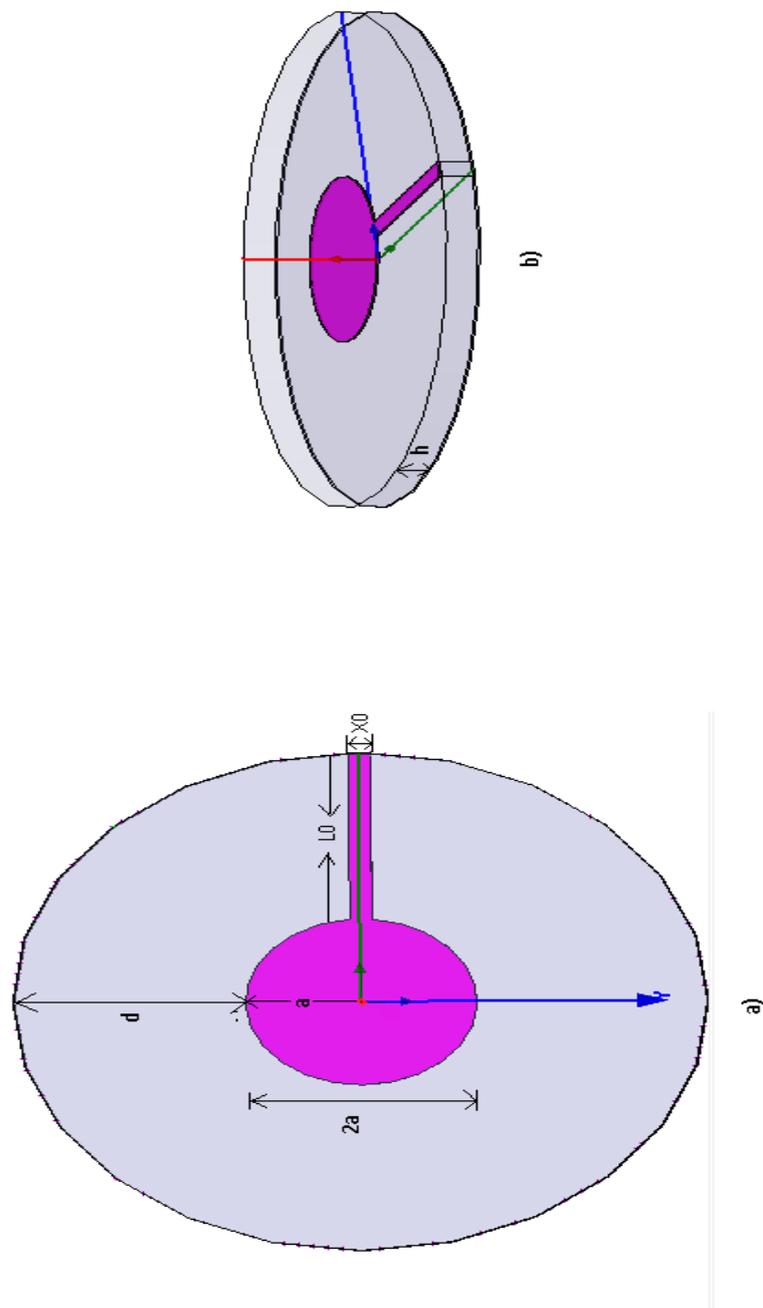


Figura 5.5: Antena 4: Antena de microfita de patch circular (a): vista superior da antena, b):vista lateral da antena.

5.3 Resultados

Esta seção traz os resultados das simulações referente a este trabalho. Baseado nos conceitos discutidos em capítulos anteriores, inicialmente foi realizada uma sé-

Tabela 5.4: Dimensões da antena 4.

	Frequência (Ghz)	a (mm)	l0 (mm)	x0 (mm)	h (mm)	d (mm)
patch	10	5,25	20,75	1	0,1	-
substrato	10	-	-	-	1,588	20,75

rie de simulações referente as antenas propostas, em que os resultados medidos e simulados foram comparados na faixa de 1 a 15 GHz. São apresentados resultados simulados com o Ansoft HFSSTM e medidos de perda de retorno em função da frequência, cartas de Smith, diagramas de radiação e os campos elétricos e magnéticos.

5.3.1 Antena 1: de uma camada dielétrica com $\epsilon_r = 2, 2$

A figura 5.6 apresenta os resultados simulados da perda de retorno desta antena. Como pode ser observado nesta figura, a frequência para a qual a antena foi projetada, 10 GHz, pôde ser observada neste caso na segunda frequência de ressonância com um valor aproximado em 10.9 GHz. Este fato ocorreu devido ao empilhamento das camadas dos substratos das antena, pois à medida que as camadas dos substratos são adicionadas, umas sobre as outras, a frequência de ressonância obtida aumenta em relação à frequência de operação inicial do projeto e também pela linha de alimentação, pois, como não entra no cálculo do projeto.

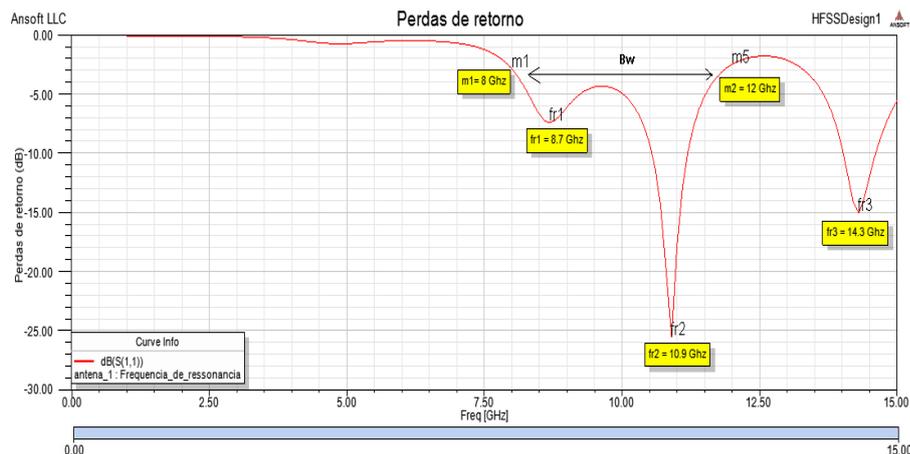


Figura 5.6: Resultados simulados da perda de retorno para a antena 1.

Dos resultados simulados, pode-se observar que a antena, na faixa de 1 a 15 GHz, apresenta três bandas de operação (fr1, fr2 e fr3) e uma larguras de banda (BW) na faixa de 8 a 12 GHz.

Na figura 5.7 pode ser vista a Carta de Smith que mostra o comportamento das três frequências apresentadas nas simulações deste protótipo de antena em que $m1=8.7$ GHz, $m2=10.9$ GHz, $m3=14.3$ GHz.

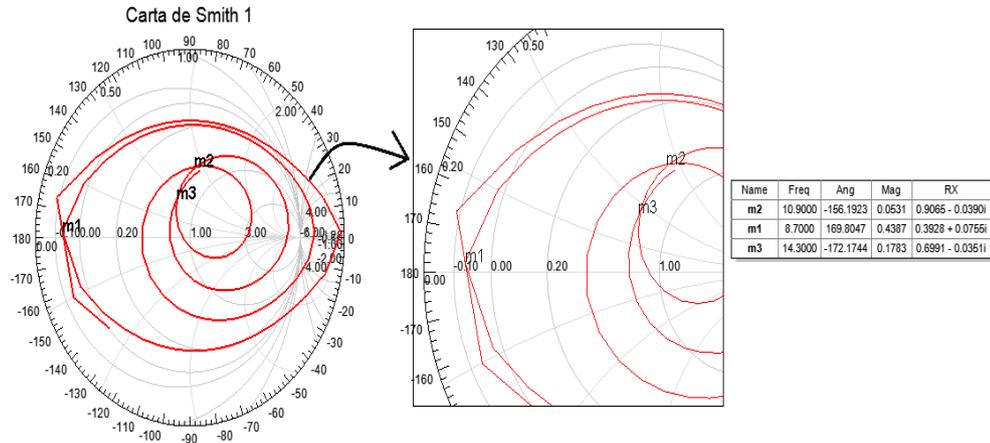


Figura 5.7: Carta de Smith para a antena 1, com ampliação dos respectivos pontos de ressonâncias.

A figura 5.8 a seguir, representa o comportamento da antena 1 através do diagrama de radiação, tanto na forma bidimensional (2D) quanto na forma polar (3D), em que ambos representam a diretividade total da antena para o ponto de ressonância que mais se aproximou da frequência de operação de 10 GHz, na faixa de frequências considerada (1 a 15 GHz).

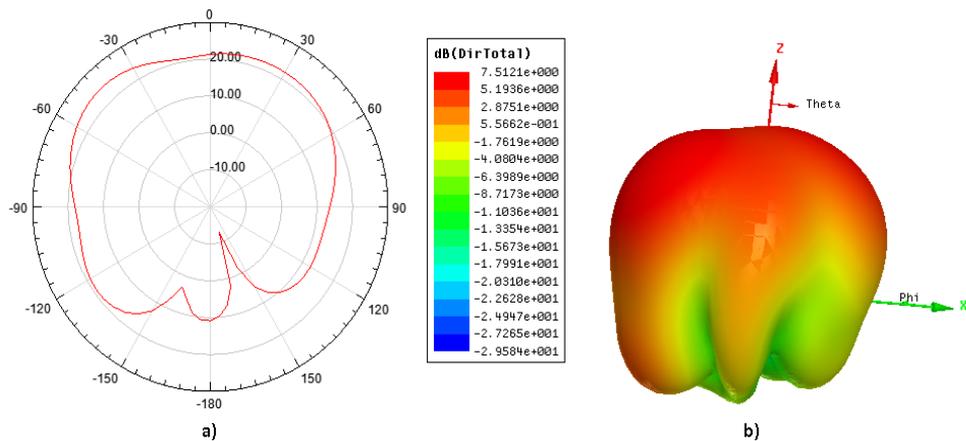


Figura 5.8: Diagrama de radiação, em dB, da antena 1 simulado para a ressonância de 8.7 GHz: a) Diagrama em 2D; b) Diagrama em 3D.

5.3.2 Antena 2: de três camadas dielétricas

O primeiro caso com o substrato da antena fractado em camadas a ser analisado refere-se à antena 2. Os resultados simulados mostram que foram obtidas quatro frequências de operação (f_{r4} , f_{r5} , f_{r6} e f_{r7}) com uma largura de banda ($BW1$) na faixa de 7 a 10.5 GHz e uma largura de banda ($BW2$) na faixa de 12 a 13.2 GHz, como ilustra a figura 5.9.

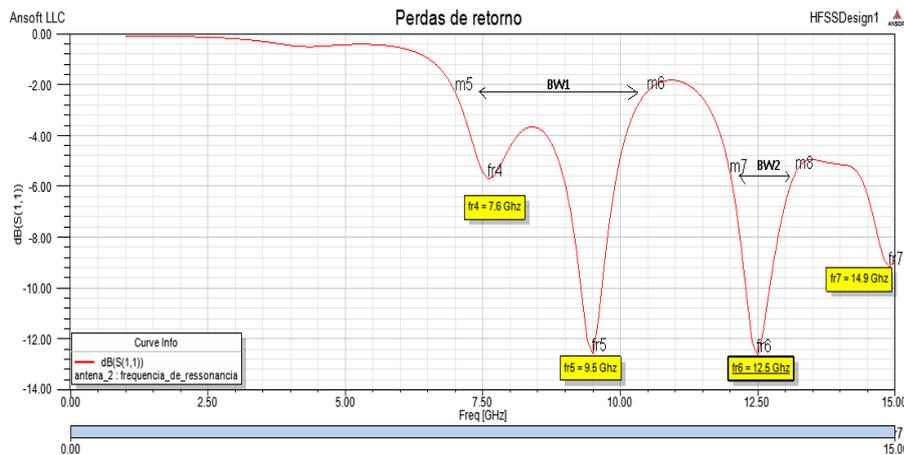


Figura 5.9: Resultados simulados da perda de retorno para a antena 2

Pode se observar neste caso que as frequências de operação da antena 2 diminuíram em relação a antena 1. Este fato ocorreu devido ao empilhamento das camadas dos substratos das antenas, pois à medida que as camadas de substratos diferentes são adicionadas, umas sobre as outras, a frequência de ressonância obtida diminui em relação à frequência de operação inicial do projeto.

Na figura 5.10 pode ser vista a Carta de Smith que mostra o comportamento das quatro frequências apresentadas nas simulações deste protótipo de antena em que $k_1 = 7.6$ GHz, $k_2 = 9.5$ GHz, $k_3 = 12.5$ GHz e $k_4 = 14.9$ GHz.

A figura 5.11 a seguir, representa o comportamento da antena 2 através do diagrama de radiação, tanto na forma bidimensional (2D) quanto na forma polar (3D), em que ambos representam a diretividade total da antena para o ponto de ressonância que mais se aproximou da frequência de operação de 10 GHz, na faixa de frequências considerada (1 a 15 GHz).

5.3.3 Antena 3: de sete camadas dielétricas

A antena 3 é o segundo caso com o substrato da antena fractado em camadas a ser analisado. A mesma é composta por 7 camadas dielétricas, como mencionado.

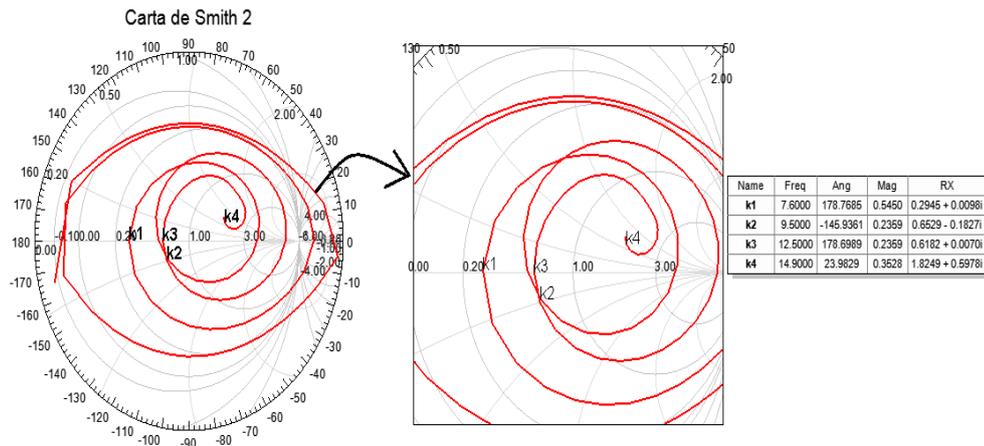


Figura 5.10: Carta de Smith para a antena 2, com ampliação dos respectivos pontos de ressonâncias.

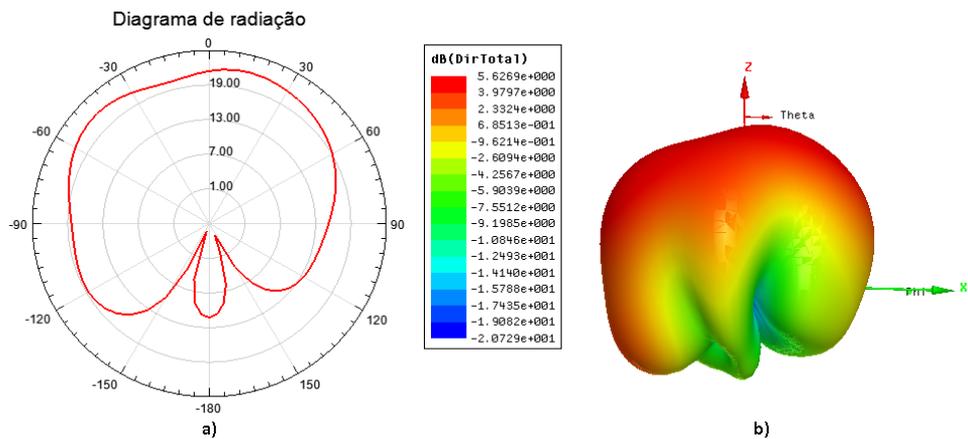


Figura 5.11: Diagrama de radiação, em dB, da antena 2 simulado para a ressonância de 7.6 GHz: a) Diagrama em 2D; b) Diagrama em 3D.

Os resultados simulados mostram que foram obtidas seis frequências de operação (fr8, fr9, fr10, fr11, fr12 e fr13) com uma largura de banda (BW3) na faixa de 6.1 a 9.4 GHz, como ilustra a figura 5.12.

Observa-se novamente neste caso que as frequências de operação da antena 3 diminuíram em relação a antena 2, fazendo aparecer mais duas frequências de operação na faixa de frequências considerada (1 a 15 GHz). Este fato ocorreu devido a mais empilhamento de camadas dos substratos das antena, como já mencionado, à medida que as camadas de substratos diferentes são adicionadas, umas sobre as outras, a frequência de ressonância obtida diminui em relação à frequência de operação inicial do projeto.

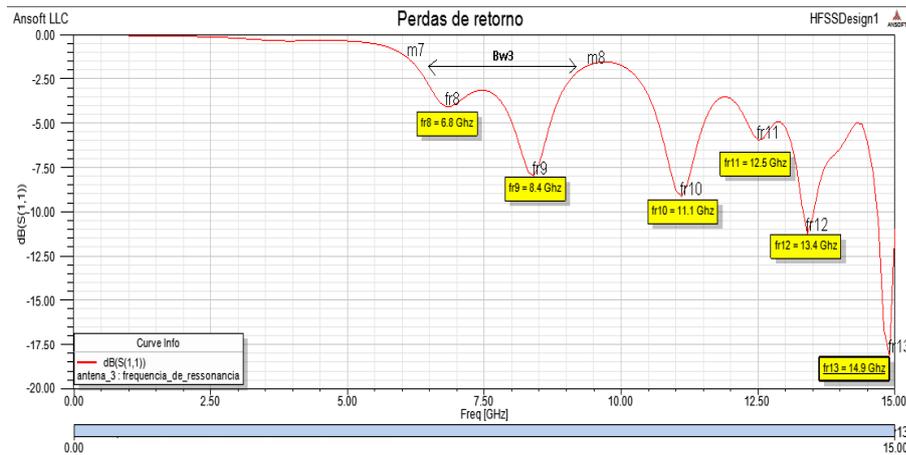


Figura 5.12: Resultados simulados da perda de retorno para a antena 3

Na figura 5.13 pode ser vista a Carta de Smith que mostra o comportamento das seis frequências apresentadas nas simulações deste protótipo de antena em que $q_1=6.8$ GHz, $q_2=8.4$ GHz, $q_3=11.1$ GHz, $q_4=12.5$ GHz, $q_5=13.4$ GHz e $q_6=14.9$ GHz.

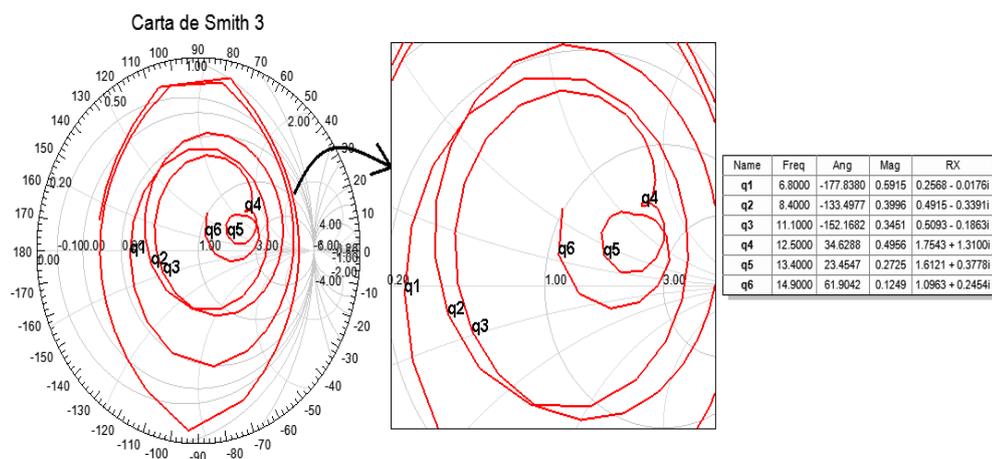


Figura 5.13: Carta de Smith para a antena 3, com ampliação dos respectivos pontos de ressonâncias.

A figura 5.14 a seguir, representa o comportamento da antena 3 através do diagrama de radiação, tanto na forma bidimensional (2D) quanto na forma polar (3D), em que ambos representam a diretividade total da antena para o ponto de ressonância que mais se aproximou da frequência de operação de 10 GHz, na faixa de frequências considerada (1 a 15 GHz).

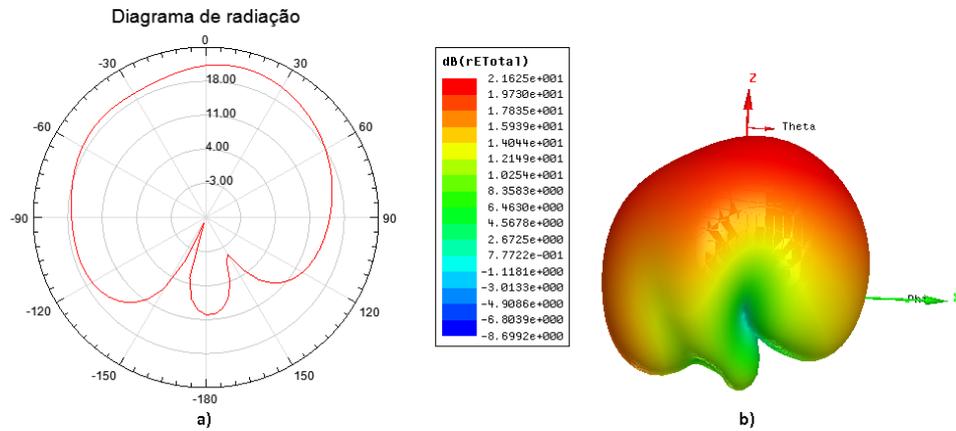


Figura 5.14: Diagrama de radiação, em dB, da antena 3 simulado para a ressonância de 6.8 GHz: a) Diagrama em 2D; b) Diagrama em 3D.

5.3.4 Antena 4: de uma camada dielétrica com $\epsilon_r = 10$

A antena 4 é o ultimo caso a ser analisado, com as mesmas dimensões do substrato da antena 1 mas com $\epsilon_r = 10$. Os resultados simulados mostram que foram obtidas onze frequências de operação (fr14, fr15, fr16, fr17, fr18, fr19, fr20, fr21, fr22, fr23 e fr24) com uma largura de banda (BW4) na faixa de 7.8 a 10.2 GHz, como ilustra a figura 5.15.

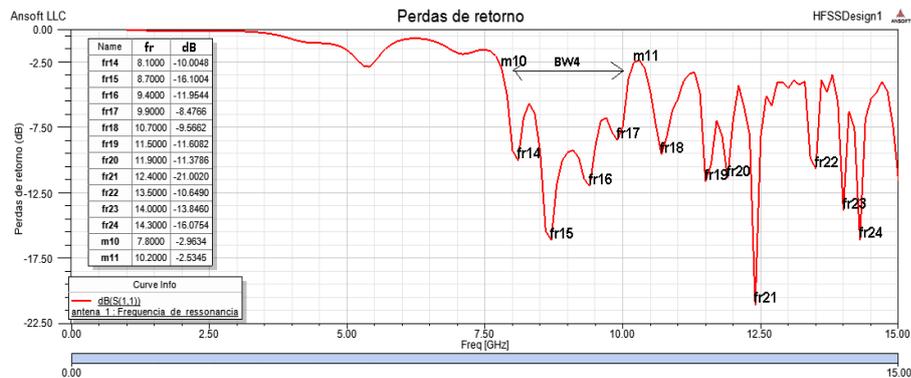


Figura 5.15: Resultados simulados da perda de retorno para a antena 4

Na figura 5.16 pode ser vista a Carta de Smith que mostra o comportamento das onze frequências apresentadas nas simulações deste protótipo de antena.

A figura 5.17 a seguir, representa o comportamento da antena 4 através do diagrama de radiação, tanto na forma bidimensional (2D) quanto na forma polar (3D), em que ambos representam a diretividade total da antena para o ponto de ressonância que mais se aproximou da frequência de operação de 10 GHz, na faixa

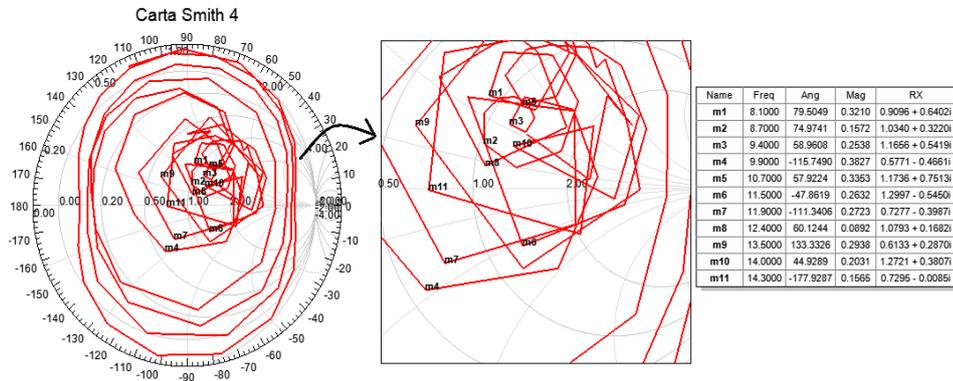


Figura 5.16: Carta de Smith para a antena 4, com ampliação dos respectivos pontos de ressonâncias.

de frequências considerada (1 a 15 GHz).

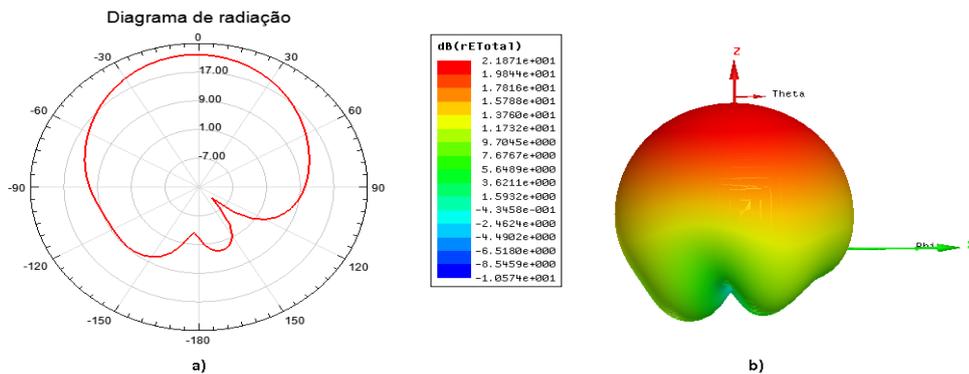


Figura 5.17: Diagrama de radiação, em dB, da antena 4 simulado para a ressonância de 5.4 GHz: a) Diagrama em 2D; b) Diagrama em 3D.

5.4 Discussões

Em todos os casos analisados foram observados deslocamentos nas frequências de ressonâncias simuladas. Além do mais, pôde-se observar consideráveis alterações no diagrama de radiação das antenas analisadas, podendo possibilitar melhor manipulação deste importante parâmetro de uma antena. As diferenças dos resultados referentes às frequências de ressonância e larguras de banda poderão ser vistas na tabelas abaixo em que serão feitas comparações entre as frequências de ressonâncias simuladas (tabela 5.5) e entre as larguras de bandas simuladas (tabela 5.6).

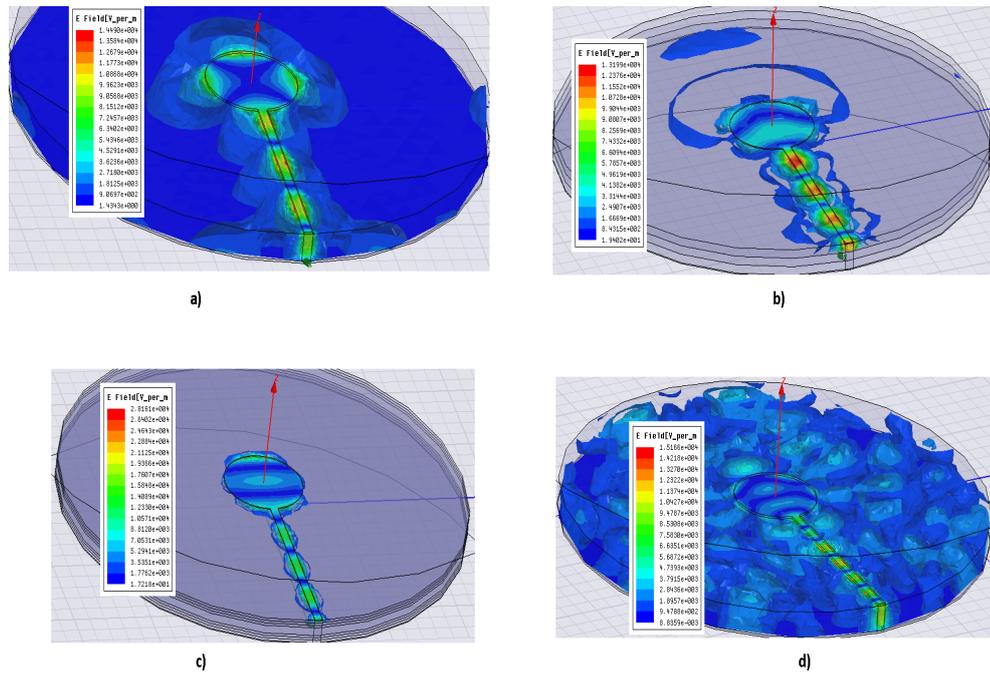


Figura 5.18: Distribuição do campo elétrico: (a) antena 1, b) antena 2, c) antena 3, d) antena 4.

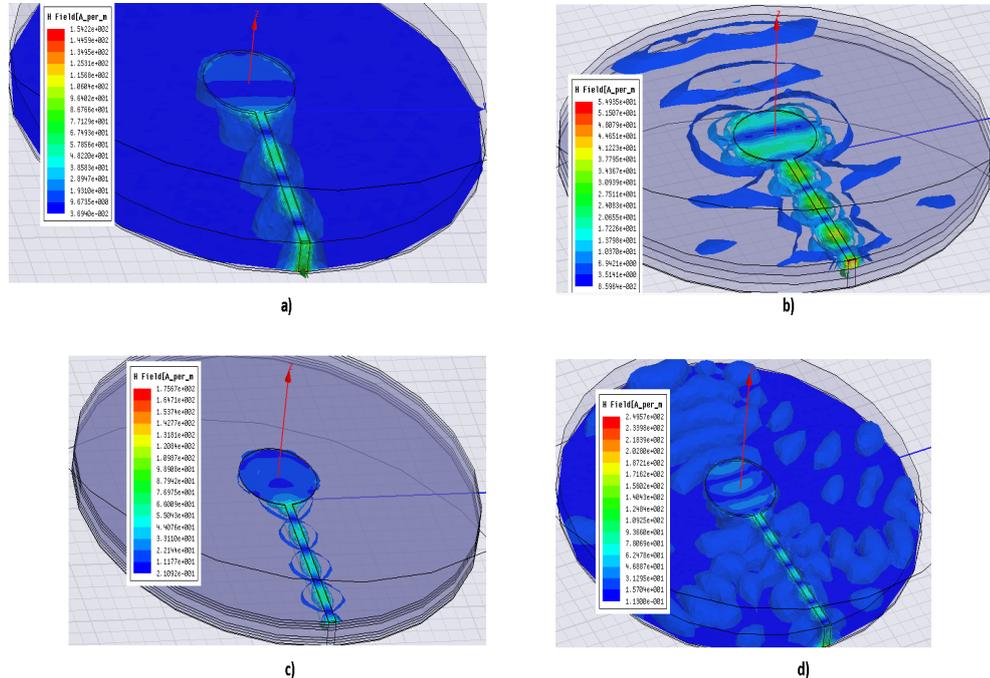


Figura 5.19: Distribuição do campo magnético: (a) antena 1, b) antena 2, c) antena 3, d) antena 4.

Tabela 5.5: Frequências de ressonâncias simuladas.

Antenas	Frequências de Ressonâncias (Ghz)												
antena 1	fr1 = 8,7	fr2 = 10,9	fr3 = 14,3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
antena 2	fr4 = 7,6	fr5 = 9,5	fr6 = 12,5	fr7 = 14,9	-	-	-	-	-	-	-	-	-
antena 3	fr8 = 6,8	fr9 = 8,4	fr10 = 11,1	fr11 = 12,5	fr12 = 13,4	fr13 = 14,9	-	-	-	-	-	-	-
antena 4	fr14 = 5,4	fr15 = 7,1	fr16 = 8,1	fr17 = 8,7	fr18 = 9,4	fr19 = 9,9	fr20 = 10,7	fr21 = 11,5	fr22 = 11,9	fr23 = 12,4	fr24 = 13,5	fr23=14	fr25 = 14,3

Tabela 5.6: Larguras de banda simuladas.

Antenas	Largura de Banda (GHz)
antena 1	BW = 4
antena 2	BW1= 3,5
antena 3	BW3= 3,3
antena 4	BW4= 2,4

5.5 Conclusão

Neste capítulo foram apresentados o projeto e as simulações de antenas fractais com multicamadas de substratos dielétricos cujos as antenas são; antena 1, antena 2, antena 3 e antena 4, observando os efeitos causados ao comportamento destas antenas a partir da comparação dos resultados obtidos através das perdas de retorno, das cartas de Smith e dos diagramas de radiação para todos os casos analisados, como também os resultados dos campos elétricos e magnéticos nas antenas simuladas.

Capítulo 6

Considerações Finais

Foram simuladas antenas de microfita circular através do *software* comercial *Ansoft Designer-HFSS*, com o intuito de estudar o efeito de substratos dielétricos organizados de forma quase-periódica na sequência de Cantor, caracterizando uma organização fractal. Pretendeu-se com isso mostrar o que ocorre com a frequência de ressonância e a largura de banda destas antenas. Da mesma forma que o patch das antenas alteram suas características, quando usados patches fractais, o substrato também faz com que as antenas tenham suas características alteradas. E duas das características de interesse neste trabalho são a frequência de ressonância e a largura de banda.

O uso de materiais comerciais para a fabricação de antenas se torna um limitante no que diz respeito à constante dielétrica relativa do material. Para se obter antenas com características diferentes, é trocado o tipo de material da antena ou então se alteram os tamanhos das antenas com a espessura do dielétrico. O tamanho, em muitas aplicações se torna fator limitante também, pois muitas vezes não se pode alterar dimensões como o raio ou espessura. Nos resta recorrer à multicamadas, e seu simples uso pode controlar a frequência de ressonância e a largura de banda, tornando o projeto mais versátil.

A iniciativa de usar um estrutura de substrato multicamadas organizadas de forma fractal, pode trazer vantagens no que diz respeito à distribuição de campos eletromagnéticos, largura de banda e frequência de ressonância, além de outras propriedades. Podemos observar que foram obtidas frequências de ressonância entre duas frequências de antenas de uma camada, a antena 1 e a antena 2, cujas primeiras frequências de ressonância são 8,7 GHz e 5,4 GHz, com frequências intermediárias de 7,6 GHz e 6,8 GHz. Percebe-se que as larguras de banda, para as antenas 1 e 4, respectivamente são, 4 e 2,4, com larguras de banda intermediárias de 3,5 e 3,3. Os resultados estão totalmente de acordo com o esperado.

Uma aplicação muito interessante para esta estrutura é aquela em que se deseja, com as mesmas dimensões da antena, obter frequências de ressonância e largura de banda diferentes. Além disso, devido à dificuldade de se obter materiais com a permissividade elétrica desejada, pode-se organizar múltiplas camadas para se obter permissividades efetivas mais adequadas ao que se deseja.

Como contribuição deste trabalho, foi apresentada uma proposta de multicamada com uma regra de construção baseada na sequência de Cantor. Entre as diversas aplicações podemos destacar dispositivos ressoadores, filtros, etc. Para trabalhos futuros propomos o uso de outras regras de construções, como a sequência de Fibonacci, a aplicação destas multicamadas em filtros e em linhas de transmissão.

Referências Bibliográficas

- [1] Girish Kumar and KP Ray. *Broadband microstrip antennas*. Artech House, 2003.
- [2] Yashar Zehforoosh, Changiz Ghobadi, and Javad Nourinia. Antenna design for ultra wideband application using a new multilayer structure. *PIERS Online*, 2(6):544–549, 2006.
- [3] Constantine A Balanis. *Antenna theory: analysis and design*. John Wiley & Sons, 2012.
- [4] TK Lo, Chun-On Ho, Y Hwang, EKW Lam, and B Lee. Miniature aperture-coupled microstrip antenna of very high permittivity. *Electronics Letters*, 33(1):9–10, 1997.
- [5] Robert A Sainati. *CAD of microstrip antennas for wireless applications*. Artech House, Inc., 1996.
- [6] M. J. Lancaster H. Y. E. Wang. Aperture-coupled thin-film superconducting meander antennas. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 47(4):829–836, 1997.
- [7] Ramesh Garg. *Microstrip antennas design handbook*. Artech House, 2001.
- [8] Elisabeth KARAS and Celso P SERRA. Fractais gerados por sistemas dinâmicos complexos. *Curitiba: Champagnat*, 1997.
- [9] S Raje, S Kazemi, and HR Hassani. Wideband stacked koch fractal antenna with h-shape aperture coupled feed. In *Microwave Conference, 2007. APMC 2007. Asia-Pacific*, pages 1–4. IEEE, 2007.
- [10] Kenneth Falconer. *Fractal geometry: mathematical foundations and applications*. Wiley. com, 2007.
- [11] Benoit B Mandelbrot. *The fractal geometry of nature*. Macmillan, 1983.

- [12] Georges A Deschamps. Microstrip microwave antennas. In *Third USAF symposium on Antennas*, 1953.
- [13] L. Lewin. Radiation from discontinuities in stripline. 107:163–170, 1960.
- [14] Keith Carver and James Mink. Microstrip antenna technology. *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on*, 29(1):2–24, 1981.
- [15] R Munson. Conformal microstrip antennas and microstrip phased arrays. *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on*, 22(1):74–78, 1974.
- [16] D. Solomon G. A. Deschamps Y. T. Lo, D. D. Harrison and F. R. Ore. Study of microstrip antennas, microstrip phased arrays and microstrip feed networks. *Rome Air Development Center, Tech*, pages 77–406, 1977.
- [17] E. E. C. de Oliveira. *Antenas de Microfita com Patch Quase-fractal para Aplicações em Redes WPAN/WLAN*. PhD thesis, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2008.
- [18] James Roderick James and Peter S Hall. *Handbook of microstrip antennas*, volume 2. IET, 1989.
- [19] ROBERTO RANNIERE CAVALCANTE DE FRANÇA. *Dispositivos Planares integrados utilizando método dinâmico com metamateriais e PBG*. PhD thesis, Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2012. Orientador: Prof. Dr. Humberto CC Fernandes.
- [20] Rajvir Singh and Amit Kumar Kohli. Multiband fractal antenna design and characterisation using antenna miniaturization techniques. 2012.
- [21] N. Cohen. Fractal antennas part i: introduction and the fractal quad. *Communication Quarterly*, pages 7–22, 1995.
- [22] Heinz Chaloupka, Norbert Klein, Michael Peiniger, Heirnut Piel, Arndt Pischke, and Georg Splitt. Miniaturized high-temperature superconductor microstrip patch antenna. *Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on*, 39(9):1513–1521, 1991.
- [23] Valdez Aragão de Almeida Filho. *Arranjos log-periódicos compactos em microfita com elementos fractais de Koch*. PhD thesis, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2010.

- [24] Soonsoo Oh, Seongho Seo, Mikyoung Yoon, Changyoul Oh, Eungbae Kim, and Youngsik Kim. A broadband microstrip antenna array for lmds applications. *Microwave and Optical Technology Letters*, 32(1):35–37, 2002.
- [25] V. F. de Barros. *Estudo do Efeito de Substratos Metamateriais em Parâmetros de Antenas de Microfita*. PhD thesis, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2012.
- [26] Shyh-Yeong Ke. Broadband proximity-coupled microstrip antennas with an h-shaped slot in the ground plane. In *Antennas and Propagation Society International Symposium, 2002. IEEE*, volume 2, pages 530–533. IEEE, 2002.
- [27] MARCELO RIBEIRO DA SILVA. *Novas Configurações de Monopolos Planares Quase-Fractais para Sistemas de Comunicações Móveis*. PhD thesis, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2008.
- [28] C. L. Nóbrega. *Otimização dos Parâmetros de Monopolos Planares de Microfita para Aplicações em Sistemas de Banda Ultra Larga*. PhD thesis, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2008.
- [29] A Derneryd. A theoretical investigation of the rectangular microstrip antenna element. *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on*, 26(4):532–535, 1978.
- [30] G. L. R. Araújo. *Efeito da Inclinação do Plano de Terra para Antenas de Microfita Multicamadas com Elementos Parasitas Fractais*. PhD thesis, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2011.
- [31] Thiago Albuquerque de Assis, José Garcia Vivas Miranda, Fernando de Brito Mota, Roberto Fernandes Silva Andrade, and Caio Mário Castro de Castilho. Fractal geometry: properties and features of ideal fractals. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 30(2):2304–1, 2008.
- [32] Ruy Madsen Barbosa. *Descobrendo a geometria fractal: para a sala de aula*. Autêntica, 2005.
- [33] Tripti Luintel. *Modified Sierpinski fractal antenna*. PhD thesis, University of Central Florida Orlando, Florida, 2004.
- [34] RA Fuzzo, V Rezende, and TS dos Santos. Fractais: algumas características e propriedades. *IV Encontro de Produção Científica e Tecnológica*, 2009.

- [35] Jaqueline Aparecida FERNANDES. Fractais: uma nova visão da matemática. *Trabalho de Conclusão de Curso, Centro Universitario de Lavras*, 2007.
- [36] D Shechtman, Ilan Blech, Denis Gratias, and John W Cahn. Metallic phase with long-range orientational order and no translational symmetry. *Physical Review Letters*, 53(20):1951–1953, 1984.
- [37] Dov Levine and Paul Joseph Steinhardt. Quasicrystals: a new class of ordered structures. *Physical review letters*, 53(26):2477, 1984.
- [38] RKP Zia and WJ Dallas. A simple derivation of quasi-crystalline spectra. *Journal of Physics A: Mathematical and General*, 18(7):L341, 1985.
- [39] TJP Penna, PMC De Oliveira, JC Sartorelli, WM Gonçalves, and RD Pinto. Long-range anticorrelations and non-gaussian behavior of a leaky faucet. *Physical Review E*, 52(3):R2168, 1995.
- [40] Françoise Axel and Hikaru Terauchi. High-resolution x-ray-diffraction spectra of thue-morse gaas-alas heterostructures: Towards a novel description of disorder. *Physical review letters*, 66:2223–2226, 1991.
- [41] R Merlin, K Bajema, Roy Clarke, F-Y Juang, and PK Bhattacharya. Quasiperiodic gaas-alas heterostructures. *Physical review letters*, 55:1768–1770, 1985.
- [42] Mahito Kohmoto and Jayanth R Banavar. Quasiperiodic lattice: Electronic properties, phonon properties, and diffusion. *Physical Review B*, 34(2):563, 1986.
- [43] G Christol, T Kamae, Michel Mendès France, and Gérard Rauzy. Suites algébriques, automates et substitutions. *Bulletin de la Société mathématique de France*, 108:401–419, 1980.
- [44] Aristid Lindenmayer and Grzegorz Rozenberg. *Automata, languages, development*. North-Holland, 1976.
- [45] Renan Gambale Romano, Tamiris Trevisan Negri, Marilaine Colnago, Suetônio de Almeida Meira, and José Roberto Nogueira. O conjunto de cantor.
- [46] Otman El Mrabet. High frequency structure simulator (hfss) tutorial. 2006.