



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**NOVAS CONFIGURAÇÕES DE MONOPOLOS
PLANARES QUASE-FRACTAIS PARA SISTEMAS DE
COMUNICAÇÕES MÓVEIS**

MARCELO RIBEIRO DA SILVA

NATAL – RN
DEZEMBRO DE 2008

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Novas Configurações de Monopolos Planares Quase-Fractais para Sistemas de Comunicações Móveis

Marcelo Ribeiro da Silva

Orientador: Prof. Dr. Adaildo Gomes D'Assunção

Co-orientador: Prof. Dr. Paulo Henrique da Fonseca Silva

Dissertação de Mestrado submetida à
Coordenação do Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Elétrica da Universidade
Federal do Rio Grande do Norte como parte
dos requisitos necessários para a obtenção do
grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

**Natal – RN
Dezembro de 2008**

NOVAS CONFIGURAÇÕES DE MONOPOLOS PLANARES QUASE-FRACTAIS PARA SISTEMAS DE COMUNICAÇÕES MÓVEIS

MARCELO RIBEIRO DA SILVA

Dissertação de Mestrado aprovada em 29 de dezembro de 2008 pela banca examinadora composta dos seguintes membros:

Prof. Dr. Adaildo Gomes D'Assunção (Orientador).....DEE/UFRN

Prof. Dr. Paulo Henrique da Fonseca Silva (Co-orientador).....CEFET/PB

Prof. Dr. Glauco Fontgalland (Examinador Externo).....DEE/UFCG

Prof. Dr. Ronaldo de Andrade Martins (Examinador Interno).....DEE/UFRN

A minha namorada e amiga Clarissa pelo
carinho e dedicação.

Dedico

Agradecimentos

A Deus por dar-me saúde e perseverança para vencer os obstáculos;

Aos meus pais, que são essenciais em minha vida, pela confiança e por todos os ensinamentos;

Ao professor Adaildo Gomes D'Assunção, por sua orientação e sabedoria, tornando possível a realização deste trabalho;

Ao professor Paulo Henrique da Fonseca Silva, do CEFET-PB, pela orientação, motivação e amizade;

À minha namorada, Clarissa de Lucena Nóbrega, pela grande ajuda prestada no desenvolvimento deste trabalho, pela paciência e por todo apoio dedicado;

Ao meu sogro e amigo, Mauro Nóbrega da Costa, por todo o suporte fornecido;

À amiga Ângela Zenaide, pelo companheirismo e amizade;

Aos demais professores e funcionários do Departamento de Engenharia Elétrica que não contribuíram diretamente com este estudo, mas que me incentivaram durante toda esta trajetória;

À CAPES, pelo apoio financeiro;

Enfim, àqueles que, embora não citados, contribuíram de forma significativa nesta dissertação.

Sumário

Lista de Figuras

Lista de Tabelas

Lista de Símbolos e Abreviaturas

Resumo

Abstract

1. Introdução	15
2. Fractais	18
2.1 Introdução	18
2.2 Características dos Fractais	19
2.2.1 Estrutura Fina	19
2.2.2 Auto-Similaridade	20
2.2.3 Simplicidade da Lei de Formação	22
2.2.4 Dimensão Fractal	22
2.3 Tipos de Fractais	25
2.3.1 Curva de Koch	26
2.3.2 Floco de Neve de Koch	28
2.3.3 Curva de Peano	30
2.3.4 Triângulo de Sierpinski	32
2.3.5 Conjuntos de Mandelbrot	34
2.4 Métodos para a Geração de Fractais	37
2.4.1 Método IFS	38
2.4.2 Sistema L	41

2.5 Síntese do Capítulo	47
3. Antenas Planares de Microfita	48
3.1 Introdução	48
3.2 Estrutura e Características	48
3.3 Métodos de Alimentação	52
3.3.1 Alimentação por Linha de Microfita	52
3.3.2 Alimentação por Cabo Coaxial	54
3.3.3 Alimentação por Acoplamento Direto	55
3.3.4 Alimentação de Acoplamento por Abertura	56
3.4 Métodos de Análise	57
3.5 Síntese do Capítulo	58
4. Monopolos de <i>Patch</i> Quase-Fractal	59
4.1 Introdução	59
4.2 Geometrias Consideradas	59
4.3 Projeto e Análise dos Monopolos	61
4.3.1 Monopolos Quase-fractais com Diferentes Níveis	62
4.3.2 Miniaturização dos Monopolos Quase-fractais	73
4.4 Síntese do Capítulo	77
5. Resultados Parametrizados e Comparativos	78
5.1 Introdução	78
5.2 Remoção do <i>Inset</i> nas Estruturas Fractais	78
5.3 Inserção do Fractal de Koch no Recorte Retangular do Plano de Terra	83
5.4 Síntese do Capítulo	88
6. Conclusões	89
Referências	90

Lista de Figuras

Capítulo 2

2.1. Senóide $y = \text{sen}(x)$.	20
2.2. Auto-similaridade de fractal. As imagens destacam: (a) auto-similaridade estrita e (b) auto-similaridade estatística.	21
2.3. Figuras afins.	22
2.4. Malha de quadrículos do método de contagem de caixas.	24
2.5. Exemplos de estruturas fractais.	25
2.6. Construção geométrica da curva de Koch.	26
2.7. Construção geométrica do floco de neve de Koch.	29
2.8. Construção da curva de Peano.	31
2.9. Construção do triângulo de Sierpinski	33
2.10. Conjunto de Mandelbrot.	35
2.11. Conjuntos de Júlia encontrados em conjuntos de Mandelbrot.	35
2.12. Seqüência de ampliações do conjunto de Mandelbrot.	37
2.13. Fractais gerados pelo método IFS. Em destaque: (a) Curva de Koch, (b) Triângulo de Sierpinski.	40
2.14. Curva de Peano gerada pelo método IFS.	41
2.15. Resultado da curva de Koch a partir do Sistema L.	45
2.16. Resultado do floco de neve de Koch a partir do Sistema L.	46
2.17. Etapas iniciais da construção da ilha de Koch com matriz $K \rightarrow K \rightarrow K$.	46

Capítulo 3

3.1. Antena de microfita com <i>patch</i> retangular.	49
3.2. Formas de representação dos elementos de <i>patch</i> de microfita.	50
3.3. Geometria de antena alimentada por linha de microfita.	53
3.4. Geometria de antena alimentada por cabo coaxial.	55
3.5. Geometria de antena alimentada por acoplamento direto.	56
3.6. Geometria de antena alimentada através de acoplamento por abertura.	57

Capítulo 4

4.1. Geometria de monopolo de microfita com <i>patch</i> retangular (nível 0). Em destaque: (a) <i>patch</i> condutor, (b) vista lateral da placa, (c) plano de terra.	60
4.2. Geometria de monopolo com <i>patch</i> quase-fractal de Koch de nível 1. Em destaque: (a) <i>patch</i> condutor, (b) vista lateral da placa, (c) plano de terra.	61
4.3. Analisador de Redes Vetorial.	62
4.4. Monopolos de microfita com <i>patches</i> quase-fractais de Koch e diferentes níveis. As fotos destacam: (a) os <i>patches</i> condutores correspondentes aos monopolos de níveis 0, 1 e 2, respectivamente, da esquerda para a direita; (b) os planos de terra.	62
4.5. Comparativo entre os resultados simulado e medido da perda de retorno para o monopolo com <i>patch</i> retangular (nível 0).	64
4.6. Comparativo entre os resultados simulado e medido do SWR para o monopolo com <i>patch</i> retangular (nível 0).	64
4.7. Comparativo entre os resultados simulado e medido da perda de retorno para o monopolo quase-fractal de nível 1.	65
4.8. Comparativo entre os resultados simulado e medido do SWR para o monopolo quase-fractal de nível 1.	66
4.9. Comparativo entre os resultados simulado e medido da perda de retorno para o monopolo quase-fractal de nível 2.	67
4.10. Comparativo entre os resultados simulado e medido do SWR para o monopolo quase-fractal de nível 2.	67
4.11. Gráficos da Carta de <i>Smith</i> para os monopolos quase-fractais, apresentando diferentes níveis. As imagens destacam: (a) resultado para o monopolo de nível 0, (b) resultado para o monopolo de nível 1 e (c) resultado para o monopolo de nível 2.	68

4.12. Gráficos do diagrama de radiação 2D para o monopolo de <i>patch</i> retangular, nível 0. As imagens destacam: (a) elevação ($\theta, \phi = 0^\circ$), (b) azimutal ($\phi, \theta = 90^\circ$).	70
4.13. Gráficos do diagrama de radiação 2D para o monopolo quase-fractal de nível 1. As imagens destacam: (a) elevação ($\theta, \phi = 0^\circ$), (b) azimutal ($\phi, \theta = 90^\circ$).	71
4.14. Gráficos do diagrama de radiação 2D para o monopolo quase-fractal de nível 2. As imagens destacam: (a) elevação ($\theta, \phi = 0^\circ$), (b) azimutal ($\phi, \theta = 90^\circ$).	71
4.15. Gráficos do diagrama de radiação 3D para os monopolos quase-fractais, apresentando diferentes níveis. As imagens destacam: (a) resultado para o monopolo de nível 0, (b) resultado para o monopolo de nível 1 e (c) resultado para o monopolo de nível 2.	72
4.16. Monopolos de microfita com <i>patches</i> quase-fractais de Koch e diferentes níveis, miniaturizados em 50%. As fotos destacam: (a) os <i>patches</i> condutores correspondentes aos monopolos de níveis 1 e 2, respectivamente, da esquerda para a direita; (b) os planos de terra.	73
4.17. Comparativo entre os resultados simulado e medido da perda de retorno para o monopolo quase-fractal de nível 1, com miniaturização de 50%.	74
4.18. Comparativo entre os resultados simulado e medido do SWR para o monopolo quase-fractal de nível 1, com miniaturização de 50%.	75
4.19. Comparativo entre os resultados simulado e medido da perda de retorno para o monopolo quase-fractal de nível 2, com miniaturização de 50%.	76
4.20. Comparativo entre os resultados simulado e medido do SWR para o monopolo quase-fractal de nível 2, com miniaturização de 50%.	76

Capítulo 5

5.1. Monopolos de microfita com <i>patches</i> quase-fractais de Koch e diferentes níveis, com $Y_0 = 0$ mm. As fotos destacam: (a) os <i>patches</i> condutores correspondentes aos monopolos de níveis 1 e 2, respectivamente, da esquerda para a direita; (b) os planos de terra.	78
5.2. Comparativo entre os resultados simulado e medido da perda de retorno para o monopolo quase-fractal de nível 1, com $Y_0 = 0$ mm.	80
5.3. Comparativo entre os resultados simulado e medido do SWR para o monopolo quase-fractal de nível 1, com $Y_0 = 0$ mm.	80
5.4. Comparativo entre os resultados medidos da perda de retorno para os monopolos quase-fractais de nível 1, com diferentes valores de Y_0 .	81
5.5. Comparativo entre os resultados simulado e medido da perda de retorno para o monopolo quase-fractal de nível 2, com $Y_0 = 0$ mm.	82

5.6. Comparativo entre os resultados simulado e medido do SWR para o monopolo quase-fractal de nível 2, com $Y_0 = 0$ mm.	82
5.7. Comparativo entre os resultados medidos da perda de retorno para os monopolos quase-fractais de nível 2 com diferentes valores de Y_0 .	83
5.8. Monopolos de microfita com <i>patches</i> quase-fractais de Koch e diferentes níveis, com a inserção do fractal de Koch nos contornos do recorte retangular do plano de terra. As fotos destacam: (a) os <i>patches</i> condutores correspondentes aos monopolos de níveis 1 e 2, respectivamente, da esquerda para a direita; (b) os planos de terra.	84
5.9. Comparativo entre os resultados simulado e medido da perda de retorno para o monopolo quase-fractal de nível 1, com fractal nos contornos da fenda do plano de terra.	85
5.10. Comparativo entre os resultados simulado e medido do SWR para o monopolo quase-fractal de nível 1, com fractal nos contornos da fenda do plano de terra.	85
5.11. Comparativo entre os resultados medidos da perda de retorno para os monopolos quase-fractais de nível 1, com e sem fractal nos contornos da fenda do plano de terra.	86
5.12. Comparativo entre os resultados simulado e medido da perda de retorno para o monopolo quase-fractal de nível 2, com fractal nos contornos da fenda do plano de terra.	87
5.13. Comparativo entre os resultados simulado e medido do SWR para o monopolo quase-fractal de nível 2, com fractal nos contornos da fenda do plano de terra.	87
5.14. Comparativo entre os resultados medidos da perda de retorno para os monopolos quase-fractais de nível 2, com e sem fractal nos contornos da fenda do plano de terra.	88

Lista de Tabelas

Capítulo 2

2.1. Comprimento da curva de Koch.	27
2.2. Comprimento do floco de neve de Koch.	30
2.3. Comprimento da curva de Peano.	31
2.4. Perímetro do triângulo de Sierpinski	34
2.5. Escalares constantes das transformações	39
2.6. Escalares constantes das transformações para a curva de Peano	41

Capítulo 3

3.1. Algumas aplicações de antenas de microfita	51
---	----

Lista de Símbolos e Abreviaturas

λ - comprimento de onda no dielétrico

λ_0 - comprimento de onda no espaço-livre

ϵ_{eff} - constante dielétrica efetiva da linha de microfita

ϵ_r - constante dielétrica do substrato

Z_0 - impedância característica da linha de microfita

ϕ - ângulo de azimute

θ - ângulo de elevação

FDTD - Finite-Difference Time Domain

FEM - Finite-Element Method

GMTI - Ground Moving Target Indicator

GPS - Global Positioning System

GTEMA - Grupo de Telecomunicações e Eletromagnetismo Aplicado

HFSS - High Frequency Structural Simulator

IFS - Iterated Function System

MoM - Method of Moments

PDA's - Personal Digital Assistants

RFID - Radio Frequency Identification

SAR - Synthetic Aperture Radar

SDT - Spectral Domain Technique

SWR - Standing Wave Ratio

UAVs - Unmanned Aerial Vehicles

UWB - Ultra-wideband

Resumo

As propriedades únicas da geometria fractal têm-se mostrado bastante úteis para a construção de filtros, superfícies seletivas em frequência, circuitos sintonizados e antenas, possibilitando soluções otimizadas para uma variedade de usos comerciais na faixa de microondas. A geometria fractal está incluída na tecnologia dos sistemas de comunicação por microondas devido a algumas propriedades interessantes para a fabricação de dispositivos compactos, com desempenho superior em termos de largura de banda, bem como, comportamento multibanda. Neste trabalho, descrevem-se os procedimentos para o projeto, construção e medição de monopolos quase-fractais de Koch, com níveis 1 e 2, projetados para se investigar o efeito produzido na largura de banda de antenas planares, a partir da utilização de estruturas quase-fractais nos seus *patches* retangulares. O efeito eletromagnético da variação do nível dos fractais, bem como, da miniaturização das estruturas, foram avaliados. Também foram realizadas parametrizações com o intuito de se verificar o comportamento da largura de banda, tanto para a perda de retorno quanto para o SWR. Os resultados foram obtidos através de medições realizadas por um analisador de redes vetorial e por meio de simulações no *Ansoft* HFSS. Algumas propostas para trabalhos futuros foram citadas.

Palavras-chave: Antenas quase-fractais, monopolos de microfitas, fractais de Koch.

Abstract

The characteristic properties of the fractal geometry have shown to be very useful for the construction of filters, frequency selective surfaces, synchronized circuits and antennas, enabling optimized solutions in many different commercial uses at microwaves frequency band. The fractal geometry is included in the technology of the microwave communication systems due to some interesting properties to the fabrication of compact devices, with higher performance in terms of bandwidth, as well as multiband behavior. This work describes the design, fabrication and measurement procedures for the Koch quasi-fractal monopoles, with 1 and 2 iteration levels, in order to investigate the bandwidth behavior of planar antennas, from the use of quasi-fractal elements printed on their rectangular patches. The electromagnetic effect produced by the variation of the fractal iterations and the miniaturization of the structures is analyzed. Moreover, a parametric study is performed to verify the bandwidth behavior, not only at the return loss but also in terms of SWR. Experimental results were obtained through the accomplishment of measurements with the aid of a vectorial network analyzer and compared to simulations performed using the *Ansoft* HFSS software. Finally, some proposals for future works are presented.

Keywords: Quasi-fractal antennas, microstrip monopoles, Koch fractal elements.

Capítulo 1

Introdução

Com o avanço dos sistemas de comunicação sem fio, é cada vez mais comum a presença da geometria fractal em diversas aplicações, devido a suas vantagens sobre a geometria Euclidiana, no que concerne à fabricação de dispositivos leves e compactos, para a utilização em equipamentos modernos. Desta forma, a geometria fractal está incluída na tecnologia dos sistemas de comunicação por microondas, com desempenho superior em termos de largura de banda, bem como, comportamento multibanda [1-4].

Ao se combinar a geometria fractal com a teoria eletromagnética, podem ser obtidas estruturas de antenas com *designs* inovadores, bem como excelentes desempenhos. A eletrodinâmica de fractais realiza essa combinação, com a finalidade de investigar uma nova classe de radiação, propagação e problemas relacionados ao espalhamento [1].

Há uma necessidade crescente pela utilização de antenas compactas, que ocupem de forma integrada o espaço limitado no interior de aparelhos com tecnologia sem fio (*wireless*), tais como: telefones celulares, receptores GPS (*Global Positioning System*), *laptops*, PDAs (*Personal Digital Assistants*), entre outros. Atualmente as aplicações dos fractais incluem: identificação por rádio frequência (RFID); sistema móvel celular; e aplicações militares, como, UAVs, SAR, GMTI [3], [4].

A geometria Euclidiana, com a qual estamos habituados, trata de objetos geométricos com formas regulares, como o ponto, as curvas e as superfícies, que são caracterizadas em termos de suas dimensões topológicas (número inteiro que caracteriza a geometria de um objeto Euclidiano). Neste contexto, diz-se que o ponto tem dimensão 0, a reta tem dimensão 1, o plano tem dimensão 2 e o espaço usual tem dimensão 3 [4].

Entretanto, existem muitas formas encontradas na natureza que estão fora da abrangência da geometria Euclidiana, por exemplo: as superfícies de nuvens e montanhas, as linhas costeiras, as raízes e ramos de árvores, os nervos e vasos sanguíneos do corpo humano, etc. Estas formas são estudadas e analisadas por matemáticos e geômetras desde o século XIX. As raízes conceituais dos fractais remontam as tentativas de medir o tamanho de objetos para os quais as definições da geometria Euclidiana falham.

Em particular, neste estudo são abordadas as antenas monopolo com *patch* quase-fractal de Koch como uma aplicação da geometria fractal para a fabricação de dispositivos de microondas. Estes dispositivos foram projetados e construídos utilizando-se os fractais com níveis diferentes, enquanto o software *Ansoft* HFSS foi utilizado no processo de simulação das antenas. As respostas em frequência destes dispositivos, até a frequência máxima de 13,5 GHz, foram medidas através de um analisador de redes vetorial do Laboratório de Medidas em Telecomunicações do CEFET-PB/GTEMA (Grupo de Telecomunicações e Eletromagnetismo Aplicado). Os resultados obtidos através das medições de coeficiente de reflexão e SWR para as antenas monopolo são discutidos em termos do efeito eletromagnético decorrente da variação do nível dos fractais de Koch utilizados na construção destes dispositivos.

O objetivo principal deste trabalho é investigar o efeito produzido na largura de banda de antenas planares, a partir da utilização de estruturas quase-fractais nos seus *patches* retangulares, além de verificar a possibilidade de se miniaturizar as estruturas construídas verificando o efeito resultante. Algumas parametrizações também são implementadas para se observar o comportamento da largura de banda.

O conteúdo deste trabalho foi dividido em 5 capítulos, descritos a seguir.

No capítulo 2 são discutidos os conceitos fundamentais sobre os principais fractais existentes, assim como suas características, os processos de construção geométrica de cada tipo de fractal, bem como os métodos para geração de fractais (IFS e Sistema L).

No capítulo 3 são apresentadas teoricamente as antenas planares de microfita. A estrutura e as características destas antenas, além das principais técnicas de alimentação utilizadas, também são discutidas. Os modelos de análise para estas estruturas são explanados de forma sucinta.

O capítulo 4 apresenta o projeto e construção dos monopolos de *patch* quase-fractal com diferentes níveis (0, 1 e 2). O desempenho de cada monopolo é discutido através dos resultados obtidos na perda de retorno e no SWR. Também é mostrado os gráficos da Carta de *Smith* e dos diagramas de radiação 2D e 3D para os três níveis de fractal. São apresentados os resultados das miniaturizações em 50% das estruturas com níveis 1 e 2. Os gráficos contendo os resultados simulados e medidos das antenas foram feitos no *software* MATLAB 7.0.

No capítulo 5 são discutidos os gráficos resultantes das parametrizações realizadas nos monopolos construídos, tanto para a perda de retorno, quanto para o SWR. Foram realizadas duas alterações nas estruturas quase-fractais com níveis 1 e 2, como: a remoção do *inset*

existente no *patch* das estruturas fractais; e a introdução do fractal de Koch nos contornos do recorte retangular do plano de terra. Os resultados comparativos entre as estruturas projetadas e cada parametrização realizada, são apresentados.

Com relação ao capítulo 6, são discutidas as conclusões do trabalho e sugeridas algumas propostas de pesquisa para trabalhos futuros.

Capítulo 2

Fractais

2.1 Introdução

A geometria fractal é o ramo da matemática que estuda as propriedades e o comportamento dos fractais. Um fractal pode ser considerado como um objeto geométrico, que pode ser dividido em partes semelhantes ao objeto original. Os fractais têm infinitos detalhes, sendo geralmente auto-similares e independentes de escala [4].

A idéia dos fractais teve sua origem em trabalhos de cientistas como: Karl Weierstrass, que em 1872 encontrou o exemplo de uma função com a propriedade de ser contínua em todo o seu domínio, mas em nenhuma parte diferenciável; e Pierre Fatou, um matemático francês que em 1905 descobriu que certas equações formadas por números complexos podem ser representadas por figuras que apresentam auto-similaridade em várias escalas. Atualmente, os gráficos destas funções matemáticas são denominados fractais.

A palavra fractal advém do adjetivo latino *fractus*, do verbo *frangere*, que significa quebrar. O termo fractal foi usado pela primeira vez em 1975 pelo matemático Benoit Mandelbrot, referindo-se a objetos construídos recursivamente, onde um aspecto do objeto limite é infinito e outro é finito, e onde em qualquer iteração, algum pedaço do objeto é uma versão em escala reduzida do objeto na iteração anterior [4], [6].

A popularização dos fractais se deu a partir de 1980, com o avanço da informática, que viabilizou a geração de objetos fractais. Desde então, eles são aplicados em ciência, tecnologia e arte gerada por computador. A beleza plástica dos fractais também é bastante atrativa. Dentre os fractais mais conhecidos, podem ser citados: conjunto de Cantor, triângulo de Sierpinski, curva de Peano, floco de neve de Koch, curva de Koch, esponja de Menger, conjunto de Mandelbrot, conjunto de Júlia, fractal de Lyapunov, vôo de Lévy.

Os fractais possuem propriedades como estrutura fina, auto-semelhança, simplicidade de formação e dimensão fractal. Eles podem ser gerados por sistema iterativo de funções, por relação de recorrência e também por processos estatísticos. Também podem ser classificados de acordo com sua auto-similaridade, havendo auto-similaridade estrita, e auto-similaridade estocástica.

O objetivo principal deste capítulo é analisar as características e as principais estruturas fractais disseminadas pelo homem, aplicáveis em antenas, filtros, superfícies seletivas de frequência, entre outros. Também são apresentados o histórico, a construção geométrica, e alguns parâmetros matemáticos, em cada tipo de fractal, além dos métodos de geração de fractais existentes.

2.2 Características dos Fractais

Os fractais geralmente são figuras de grande complexidade, com detalhes que se multiplicam em suas partes mais ínfimas. A não ser em casos mais simples, o computador é o único instrumento capaz de construir a imagem de um fractal que se aproxime razoavelmente daquilo que o fractal realmente é [7].

Os fractais possuem algumas características fundamentais que os destacam de outras geometrias, tais como: estrutura fina, auto-similaridade, simplicidade da lei de formação, dimensão fractal e complexidade infinita.

2.2.1 Estrutura Fina

O grau de detalhamento de um fractal não diminui ao ser examinada uma pequena porção arbitrária do mesmo. Ao ser observado, por exemplo, um pequeno trecho da curva de Koch (ver tópico 2.3.1), encontra-se a mesma riqueza de detalhes da curva inteira. Esta característica dos fractais denomina-se estrutura fina.

As figuras geométricas convencionais não possuem estrutura fina, é o caso da senóide da Fig.2.1, descrita pela equação $y = \text{sen}(x)$, no intervalo $(-2\pi, 2\pi)$. A curva apresenta uma série de detalhes no intervalo considerado, como máximos e mínimos, declives variáveis, pontos de inflexão, etc [7].

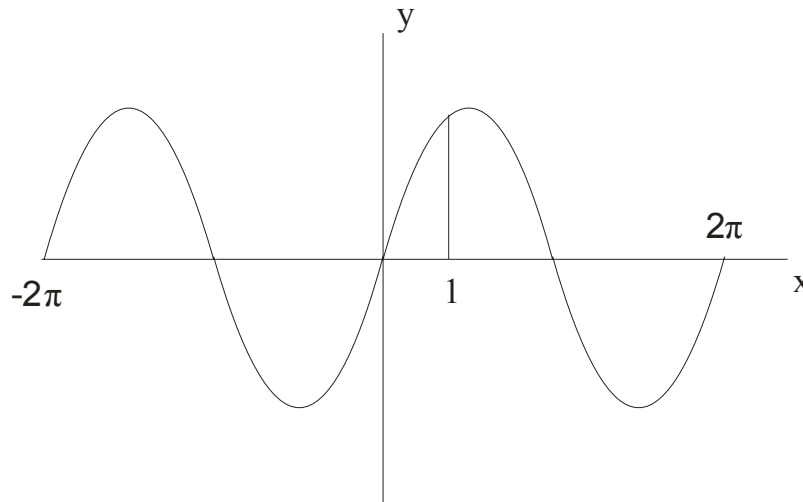


Fig.2.1. Senóide $y = \text{sen}(x)$.

Ao ser focalizado um pequeno trecho da senóide, como o intervalo $(0,1)$, o grau de detalhamento diminui consideravelmente, havendo apenas uma ligeira curvatura e nada mais. Em um intervalo de alguns milésimos de radiano, por exemplo, a senóide assumiria um aspecto praticamente retilíneo. À medida que a região observada diminui, o detalhamento tende a desaparecer, evidenciando a ausência de estrutura fina na Fig.2.1.

2.2.2 Auto-similaridade

A auto-similaridade, também denominada de auto-semelhança, é a simetria através das escalas [8]. Um objeto possui auto-similaridade ao apresentar o mesmo aspecto em qualquer escala de observação. A semelhança manifesta-se em qualquer nível de construção do fractal, fazendo com que uma parte do fractal se assemelhe a uma parte maior, ou ao fractal inteiro [7].

Alguns gêneros de fractais apresentam uma auto-similaridade estrita, ou seja, uma porção do fractal reproduz exatamente a forma de uma porção maior. Em outros fractais, observa-se uma auto-similaridade estocástica, isto é, caracterizada estatisticamente: os elementos de uma certa parte da figura enquadram-se em uma determinada modalidade de distribuição estatística, com uma média e um desvio padrão. Uma subparte da parte considerada tem os seus elementos enquadrados na mesma distribuição, podendo acontecer

que a média e o desvio padrão sejam afetados pelo fator de redução da parte original para a subparte. A Fig. 2.2 exemplifica os dois tipos de auto-similaridade descritos [7-9].

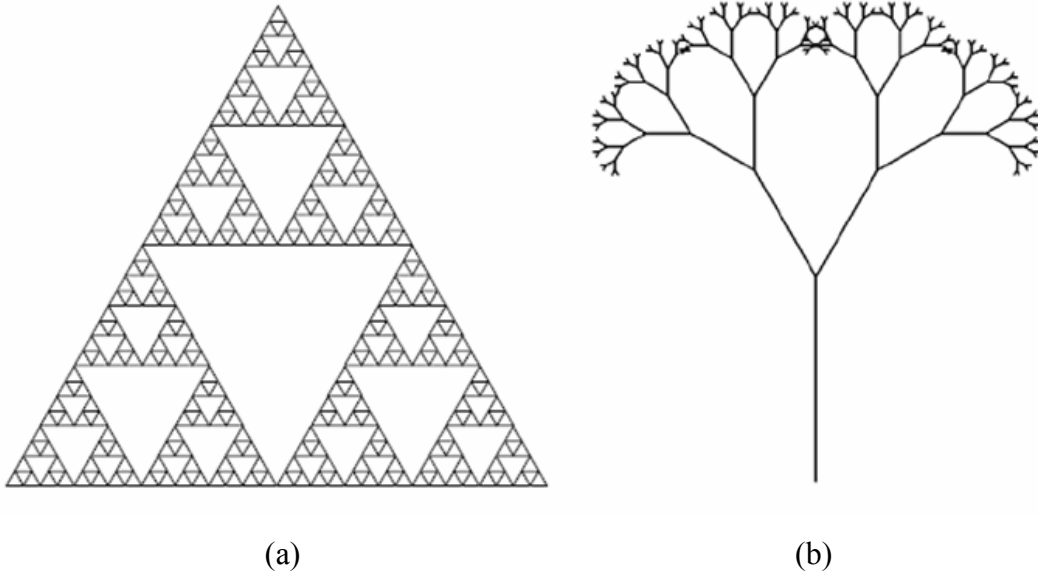


Fig. 2.2. Auto-similaridade de fractal. As imagens destacam: (a) auto-similaridade estrita e (b) auto-similaridade estatística.

A auto-afinidade é um gênero de auto-similaridade, porém mais amplo: se uma figura contrair-se de maneira uniforme em todas as direções, formar-se-á uma replica geométrica semelhante à figura original. Um círculo que se contrai desse modo formará um círculo menor, todavia, se a contração for efetuada uniformemente em uma só direção, resultará numa elipse. Quando a contração não for uniforme, mas variar em intensidade de direção de ponto para ponto, a figura resultante será distorcida e poderá não se enquadrar em uma modalidade identificável, entretanto, conservará assim mesmo a afinidade com a figura original. Na Fig.2.3 podem-se observar figuras afins, com variação de suas formas [7].

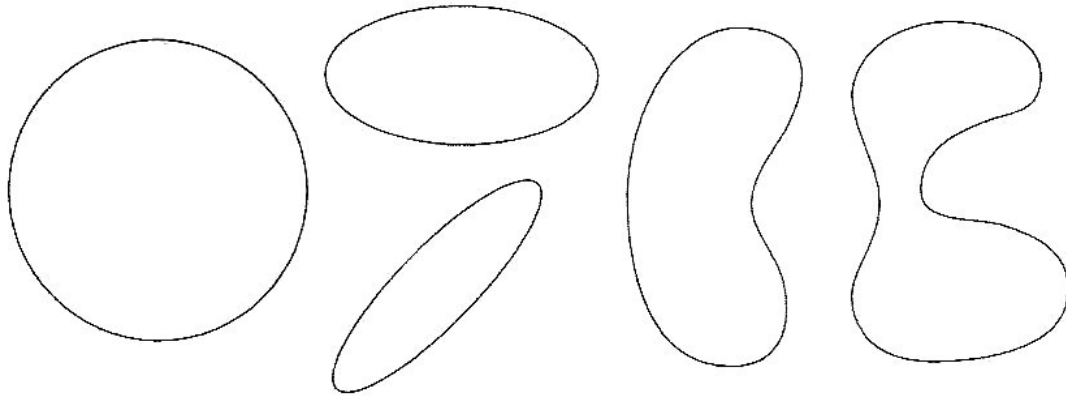


Fig.2.3. Figuras afins

2.2.3 Simplicidade da Lei de Formação

Apesar da riqueza de detalhes e da complexidade da estrutura dos fractais, estes são formados por processos relativamente simples e diretos. O processo de construção é frequentemente iterativo (repetitivo) ou recorrente (recursivo), podendo ocorrer também por processos estocásticos. A repetitividade em grande escala das operações requeridas na formação de um fractal torna o computador uma ferramenta indispensável, uma vez que, após sucessivas ampliações, sempre existirão reentrâncias e saliências cada vez menores [7], [8].

Geralmente, os fractais gerados por sistemas de funções iteradas apresentam uma auto-similaridade exata, enquanto que, as relações de recorrência geram fractais que são quase-auto-similares, mas não exatamente auto-similares, como os conjuntos de Júlia e Mandelbrot [10].

Embora a formação dos fractais seja simplificada, não é possível descrevê-los em soluções de equações simples, ao contrário do que ocorre em figuras geométricas clássicas. As equações regem a formação dos fractais, mas não os descrevem analiticamente como a equação $y = ax + b$ descreve uma reta, por exemplo [7].

2.2.4 Dimensão Fractal

As figuras geométricas convencionais apresentam dimensão bem determinada. As linhas são figuras unidimensionais (dimensão 1); as superfícies são bidimensionais (dimensão 2); e os sólidos são tridimensionais (dimensão 3). A dimensão de uma figura geométrica não depende nem da forma nem do tamanho da figura: uma linha é

unidimensional, seja ela reta ou curva; uma superfície é bidimensional seja ela plana, esférica ou de qualquer outra forma, e qualquer extensão. A dimensão de uma figura assim caracterizada é uma dimensão topológica, expressida sempre como um número inteiro. Os fractais, por sua vez, também possuem dimensão topológica. A curva de Koch (ver tópico 2.3.1) tem a dimensão topológica de uma curva qualquer, ou seja, dimensão 1. Outros fractais apresentam dimensão topológica 2 ou maior [7].

Há também o conceito de dimensão espacial, relacionado ao espaço que a figura ocupa. A curva de Koch, devido ao detalhamento que apresenta em escalas arbitrariamente pequenas, ocupa mais espaço que uma curva convencional (não dotada de estrutura fina), apresentando então, uma dimensão maior que a unidade, mas sem ocupar tanto espaço quanto a caixa do plano que a contém. Desta forma, apresenta dimensão maior que 1 e menor que 2, sendo uma dimensão fracionária. As dimensões fracionárias são usualmente denominadas dimensões fractais.

A dimensão fractal mede o grau de irregularidade, o grau de ocupação da figura no espaço, a estrutura e o comportamento da proliferação. Cada imagem tem suas dimensões diferentes e próprias [8].

Quando um fractal apresenta auto-similaridade estrita, sua dimensão pode ser determinada por um método simples, baseado na passagem de um dado nível na construção do fractal para o nível imediatamente seguinte. O método consiste em obter réplicas menores da figura original, que pode decorrer de sua ampliação ou divisão. Assim, a dimensão espacial é calculada da seguinte maneira [7], [8]:

$$\dim = - \frac{\ln N}{\ln R} \quad (2.1)$$

Onde N é o número de subpartes similares a parte original e R é o coeficiente de redução do fractal que representa o quanto será reduzido da subparte em relação à parte original.

Outro método para se determinar a dimensão espacial, não sujeito ao requisito da existência de auto-similaridade, e aplicável a qualquer figura, é o método da contagem de caixas. No caso de uma figura plana, reduz-se a uma contagem de quadrículos, de modo que se cobre a figura com uma malha de quadrículos de lado δ , como mostra a Fig.2.4 [7]. Contam-se quantos quadrículos contêm pelo menos um ponto da figura (quadrículos

hachurados), sendo n esse número, enquanto l corresponde ao lado da moldura escolhida para inserir a figura. Se o valor de δ for grande, ou seja, a malha for muito larga, a cobertura será pouco precisa, pois alguns quadrículos conterão apenas uma porção diminuta da figura, ficando vazio o resto de sua área. A precisão aumentará ao ser estreitada a malha, diminuindo o lado δ dos quadrículos, fazendo-o tender para zero [7], [8]. No limite,

$$D = \lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{\ln n}{\ln \left(\frac{l}{\delta} \right)} \quad (2.2)$$

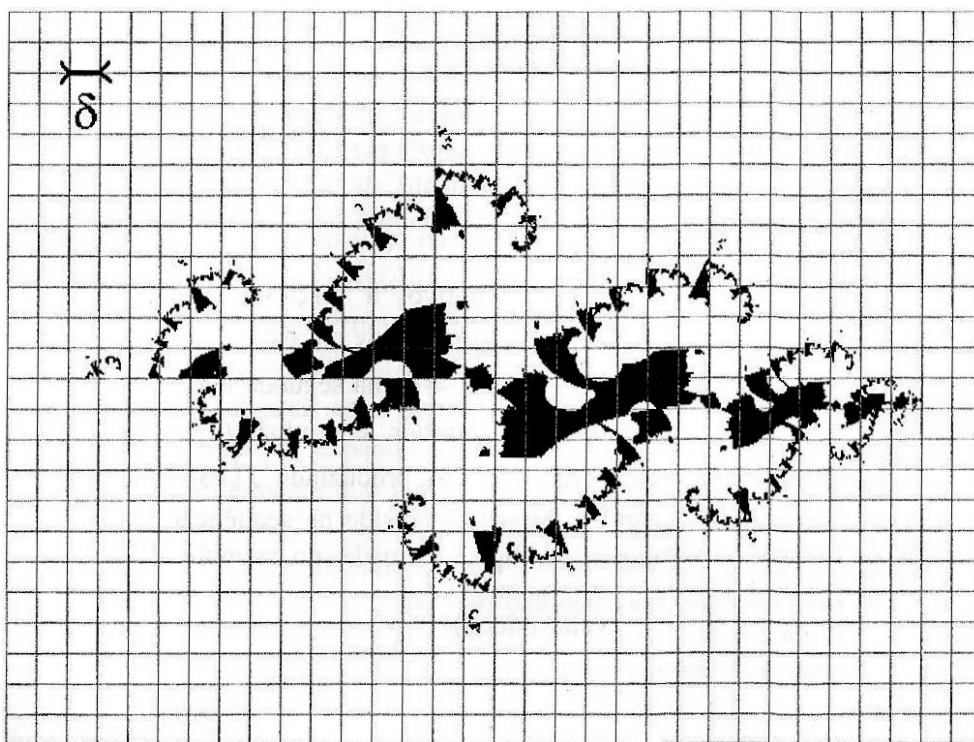


Fig.2.4. Malha de quadrículos do método de contagem de caixas.

O método descrito é adequado para o uso no computador, empregando-se elementos finitos ao invés de quadrículos infinitamente pequenos, desde que δ seja suficientemente pequeno e que seja possível detectar a condição do quadrículo conter ou não uma parte do fractal.

As figuras geométricas convencionais apresentam dimensão espacial igual a dimensão topológica (número inteiro), porém, isso não ocorre para os fractais, uma vez que, a dimensão espacial não é necessariamente igual a dimensão topológica [7].

2.3 Tipos de Fractais

De acordo com os tipos de fractais existentes, estes podem ser subdivididos basicamente em duas categorias [8], [11]:

- Fractais geométricos: derivam da geometria tradicional, sendo gerados por meio de iterações a partir de uma figura inicial, tais como: curva de Koch, floco de neve de Koch, curva de Peano, triângulo de Sierpinski, etc;
- Fractais aleatórios: são gerados por computador, sendo o resultado de iterações operadas num sistema não-linear, de forma recursiva, tais como: conjunto de Júlia, conjunto de Mandelbrot, etc.

Na Fig.2.5 abaixo, pode-se observar alguns tipos de fractais [4].

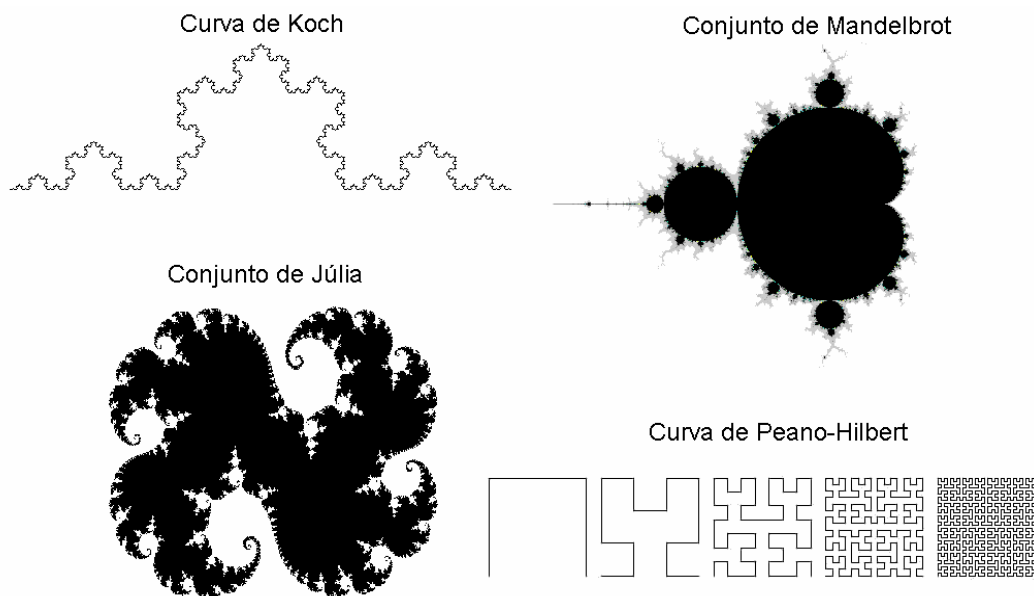


Fig.2.5. Exemplos de estruturas fractais.

2.3.1 Curva de Koch

O matemático Niels Fabian Helge Von Koch nascido em Estocolmo, na Suécia, ficou famoso através de um artigo publicado em 1904, sobre uma curva sem tangentes, que atualmente é conhecida como curva de Koch [9].

A curva de Koch é considerada um dos fractais mais simples. De acordo com a Fig.2.6, observa-se que a sua construção geométrica segue alguns níveis, apresentados abaixo [11], [12]:

- Nível 0: constrói-se um segmento de reta;
- Nível 1: o segmento de reta é dividido em três partes iguais, sendo que o segmento médio formará um triângulo equilátero sem a base, de modo a gerar uma linha poligonal com quatro segmentos de comprimento igual;
- Nível 2: repete-se o nível 1 para cada um dos segmentos obtidos;
- Nível n : repete-se o processo $n-1$ até o infinito.

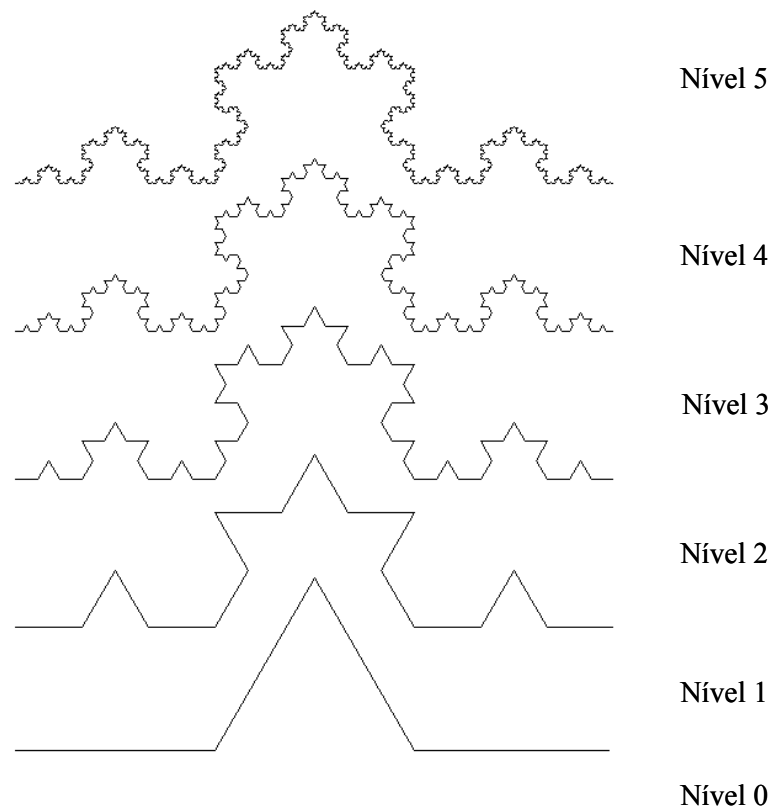


Fig.2.6. Construção geométrica da curva de Koch.

Na Tab.2.1 pode-se observar que à medida que se aumenta o nível da curva de Koch, é obtida uma progressão geométrica de termo geral dado na tabela, onde n é o nível do fractal. O comprimento total da curva é o produto entre o número de segmentos e o comprimento de cada segmento (considerado com valor unitário), em cada nível.

Tab.2.1. Comprimento da curva de Koch.

Nível	0	1	2	3	...	n
Número de segmentos	1	4	16	64	...	4^n
Comprimento de cada segmento	1	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{9}$	$\frac{1}{27}$	...	$\frac{1}{3^n}$
Comprimento total da curva	1	$\frac{4}{3}$	$\frac{16}{9}$	$\frac{64}{27}$	...	$\left(\frac{4}{3}\right)^n$

A dimensão deste fractal supõe que o segmento inicial tem comprimento 1. Em cada nível, um segmento desta curva dará origem a quatro segmentos ($N = 4$), e o coeficiente de redução denominado de R , é $\frac{1}{3}$, sendo um valor padrão do fractal. Assim, observa-se como dimensão da curva [11], [12]:

$$\dim = -\frac{\ln(N)}{\ln(R)} = -\frac{\ln(4)}{\ln\left(\frac{1}{3}\right)} = \frac{\ln(4)}{\ln(3)} \cong 1,2618 \quad (2.3)$$

Este fractal apresenta como principais características [9], [11]:

- Auto-similaridade: é possível encontrar em cada nível da curva de Koch quatro cópias da figura no nível anterior em tamanho reduzido, ocorrendo o mesmo para cada uma destas quatro partes;
- Estrutura fina: não importa o quanto é ampliada a curva de Koch, a quantidade de detalhes que é observada continua sendo grande;
- Fácil construção: como foi visto na construção geométrica acima, o processo de obtenção da curva é simples, repete-se o nível anterior a partir do nível $n-1$;
- Difícil descrição matemática: apesar da facilidade de construção, não existe uma função analítica simples que descreva a curva de Koch.

2.3.2 Floco de Neve de Koch

O floco de neve de Koch foi originado a partir da curva de Koch, e recebe este nome devido à semelhança com um floco de neve. Parte do mesmo processo construtivo da curva de Koch, porém, origina-se de um triângulo equilátero, e não de um segmento de reta, onde cada lado do triângulo é substituído por uma curva de Koch (Fig.2.7), formando o floco de neve de Koch [9].

O processo de construção do floco de neve ocorre da seguinte forma [11], [12]:

- Nível 0: constrói-se um triângulo equilátero;
- Nível 1: divide-se em três partes iguais cada um dos lados do triângulo, construindo-se sobre cada um dos segmentos médios um novo triângulo equilátero. Assim, é obtida a “estrela de David” com 12 lados;
- Nível 2: repete-se o processo de construção do nível 1 sobre cada um dos lados da figura obtida anteriormente;
- Nível n : repete-se o nível $n-1$ até o infinito.

Na Fig.2.7 abaixo, podemos observar o processo de construção deste fractal.

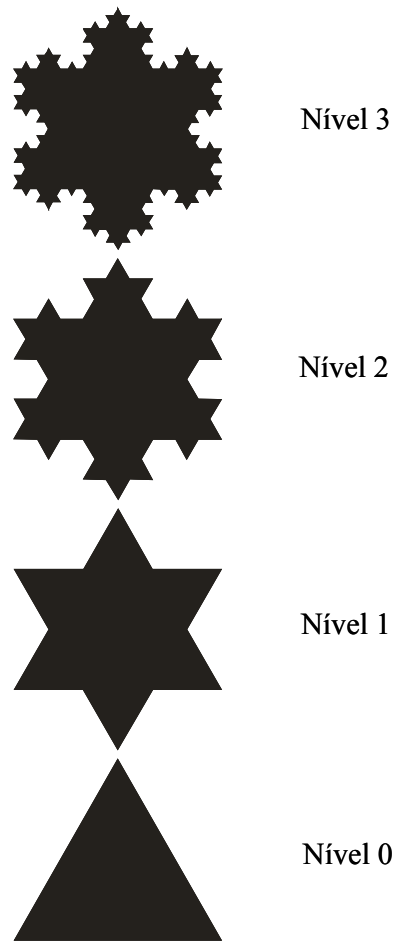


Fig. 2.7. Construção geométrica do floco de neve de Koch.

Uma vez que a construção do floco de neve de Koch parte de um triângulo equilátero, e cada lado representa uma curva de Koch, o perímetro do triângulo é três vezes o valor do comprimento total da curva (Tab.2.2).

Tab.2.2. Comprimento do floco de neve de Koch.

Nível	0	1	2	3	...	n
Número de segmentos	3	12	48	192	...	3×4^n
Comprimento de cada segmento	1	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{9}$	$\frac{1}{27}$	...	$\frac{1}{3^n}$
Comprimento do floco de neve	3	4	$\frac{16}{3}$	$\frac{64}{9}$	...	$3 \times \left(\frac{4}{3}\right)^n$

A dimensão desse fractal seguirá da mesma maneira que a curva de Koch. Em cada nível, um segmento dará origem a quatro segmentos ($N = 4$), sendo reduzidos em $R = \frac{1}{3}$. Assim, tem-se como dimensão do floco de neve [11], [12]:

$$\dim = -\frac{\ln(N)}{\ln(R)} = -\frac{\ln(4)}{\ln(\frac{1}{3})} = \frac{\ln(4)}{\ln(3)} \cong 1,2618 \quad (2.4)$$

Por ser um fractal originado a partir da curva de Koch, o floco de neve de Koch possui as mesmas características apresentadas na seção 2.2.1.

2.3.3 Curva de Peano

Giuseppe Peano, logicista e matemático italiano, estudou matemática na Universidade de Turim, onde foi professor desde 1890 até a sua morte. Foi em 1890 que Peano inventou as curvas que levam o seu nome e que preenchem o plano [9].

O processo de construção geométrica da curva de Peano é mostrado na Fig.2.8, de acordo com os seguintes níveis [11], [12]:

- Nível 0: um segmento de reta é construído;
- Nível 1: esse segmento é dividido em três partes iguais. Sobre o segmento médio, um retângulo bisetado é construído, formando dois quadrados com lado igual ao segmento que lhes deu origem;

- Nível 2: em cada um dos nove segmentos formados anteriormente, repete-se o mesmo procedimento do nível 1;
- Nível n : repete-se o nível $n-1$ sucessivamente, até ao infinito.

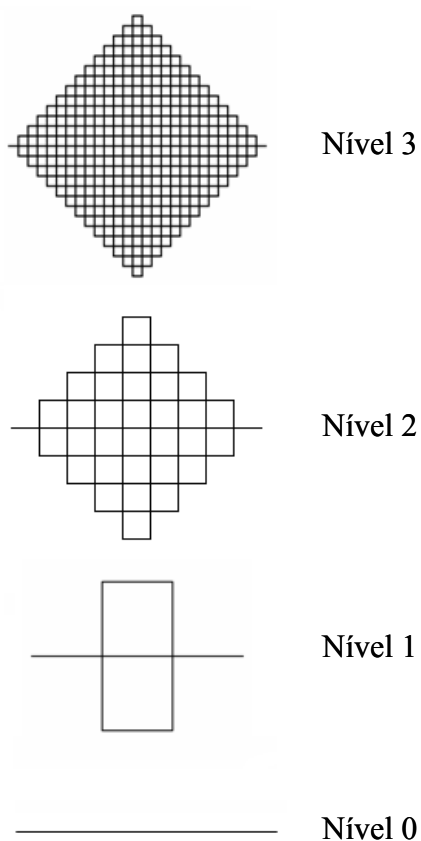


Fig.2.8. Construção da curva de Peano.

Deste fractal, é possível retirar informações relativas ao número de segmentos, comprimento de cada segmento e comprimento total da curva em cada nível de construção do fractal. Estas informações estão listadas na Tab.2.3.

Tab.2.3. Comprimento da curva de Peano.

Nível	0	1	2	3	4	...	n
Número de segmentos	1	9	81	729	6561	...	9^n
Comprimento de cada segmento	1	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{9}$	$\frac{1}{27}$	$\frac{1}{81}$	...	$\frac{1}{3^n}$
Comprimento total da curva	1	3	9	27	81	...	3^n

Para calcularmos a dimensão da curva, supõe-se que o segmento inicial tenha comprimento 1. Em cada iteração substitui-se sempre um segmento por nove ($N = 9$), possuindo um coeficiente de redução R , igual a $\frac{1}{3}$. O resultado obtido será [11], [12]:

$$\dim = -\frac{\ln(N)}{\ln(R)} = -\frac{\ln(9)}{\ln(\frac{1}{3})} = \frac{\ln(9)}{\ln(3)} = 2 \quad (2.5)$$

Esta curva possui como principais características [9], [11]:

- Auto-similaridade: a curva de Peano no nível 1 possui nove segmentos, e como as substituições são efetuadas em cada um destes, pode-se encontrar miniaturas da curva no nível 1 em nove partes do nível 2. Deste mesmo modo, pode-se encontrar nove miniaturas do nível 2 no nível 3, e assim sucessivamente.
- Estrutura fina: ao ampliar a curva, não importando o fator de ampliação, não se perde a quantidade de detalhes que a mesma possui;
- Fácil construção: como observado na construção geométrica acima, o processo de obtenção da curva é simples, com apenas um passo repetido indefinidamente.
- Difícil descrição analítica: não é possível descrever esta curva através de simples funções analíticas.

2.3.4 Triângulo de Sierpinski

Nascido em Varsóvia, o matemático Waclaw Sierpinski, criou o fractal triângulo de Sierpinski em 1916. Foi professor, publicando 724 artigos e 50 livros [9].

A construção desse fractal baseia-se em [11], [12]:

- Nível 0: constrói-se um triângulo equilátero (sólido);
- Nível 1: determinam-se os pontos médios de cada um dos lados do triângulo, unindo através de segmentos esses pontos médios (2 a 2), e considerando os quatro triângulos resultantes. Retira-se o triângulo central, obtendo-se assim, três triângulos sólidos;
 - Nível 2: aplica-se o procedimento descrito no nível anterior a cada um dos três triângulos resultantes, obtendo-se nove triângulos sólidos;
 - Nível n : aplica-se o procedimento descrito no nível 1 a cada um dos triângulos sólidos obtidos no nível $n-1$, até ao infinito.

A Fig.2.9 mostra o processo de construção deste fractal.

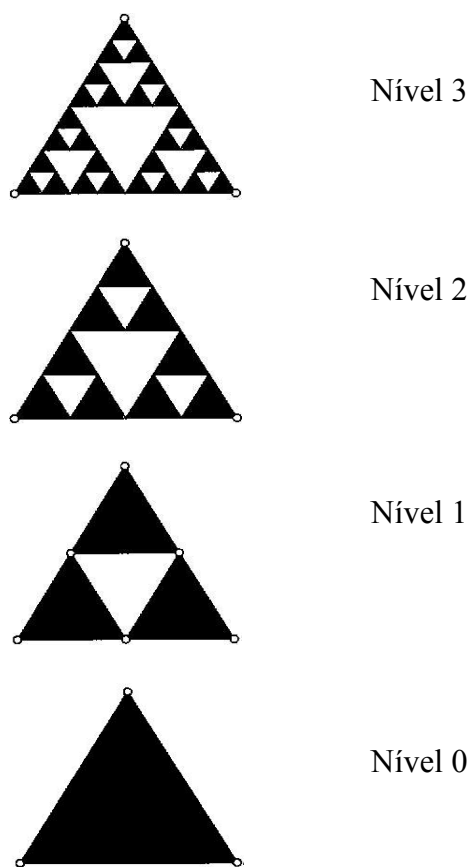


Fig.2.9. Construção do triângulo de Sierpinski

Na Tab.2.4 é possível obter o perímetro do triângulo de Sierpinski em cada nível de construção do fractal a partir do número de triângulos e do perímetro de cada triângulo.

Tab.2.4. Perímetro do triângulo de Sierpinski.

Nível	0	1	2	3	...	n
Número de triângulos	1	3	9	27	...	3^n
Perímetro de cada triângulo	3	$\frac{3}{2}$	$\frac{3}{4}$	$\frac{3}{8}$	...	$\frac{3}{2^n}$
Perímetro do triângulo de Sierpinski	3	$\frac{9}{2}$	$\frac{27}{4}$	$\frac{81}{8}$	...	$3 \times \left(\frac{3}{2}\right)^n$

A dimensão do triângulo de Sierpinski pode ser calculada a partir das variáveis N e R , onde N representa a quantidade de segmentos do fractal que será 3, e R representa o coeficiente de redução que será $\frac{1}{2}$. Desse modo, tem-se [11], [12]:

$$\dim = -\frac{\ln(N)}{\ln(R)} = -\frac{\ln(3)}{\ln\left(\frac{1}{2}\right)} = \frac{\ln(3)}{\ln(2)} = 1,59 \quad (2.6)$$

O triângulo de Sierpinski é uma figura fractal, pois apresenta as características mencionadas abaixo [9], [11]:

- Estrutura fina;
- Auto-similaridade estrita;
- Simplicidade na lei de formação;
- Processo de construção repetitivo;
- O fractal não é descrito de um modo analiticamente simples.

2.3.5 Conjuntos de Mandelbrot

O conjunto de Mandelbrot foi criado por Benoit Mandelbrot, um matemático polonês, nascido em Varsóvia, no ano de 1924, em uma família de judeus lituanos. Mandelbrot se refugiou com a família em Paris, em 1936 e tornou-se doutor em Matemática pela Universidade de Paris em 1952 [11]. Na Fig.2.10, pode-se observar uma imagem do conjunto de Mandelbrot.

Mandelbrot também descobriu uma maneira de generalizar uma classe de formas conhecidas por conjuntos de Júlia. Estas tinham sido concebidas e estudadas durante a primeira Guerra Mundial por Júlia e Pierre Fatou, que trabalhavam sem o auxílio computacional. Em 1979, Mandelbrot descobriu que podia criar uma imagem num plano complexo que poderia servir como um catálogo dos conjuntos de Júlia inseridos nos de Mandelbrot (Fig.2.11).

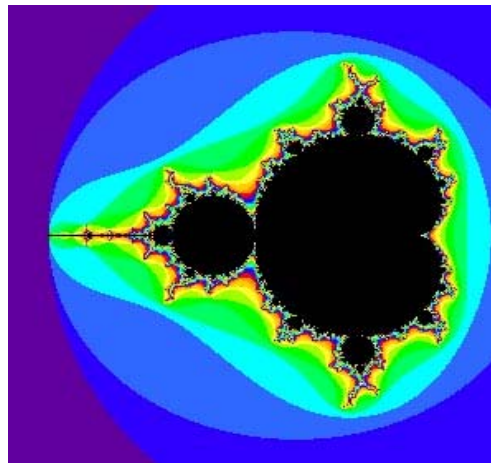


Fig.2.10. Conjunto de Mandelbrot.

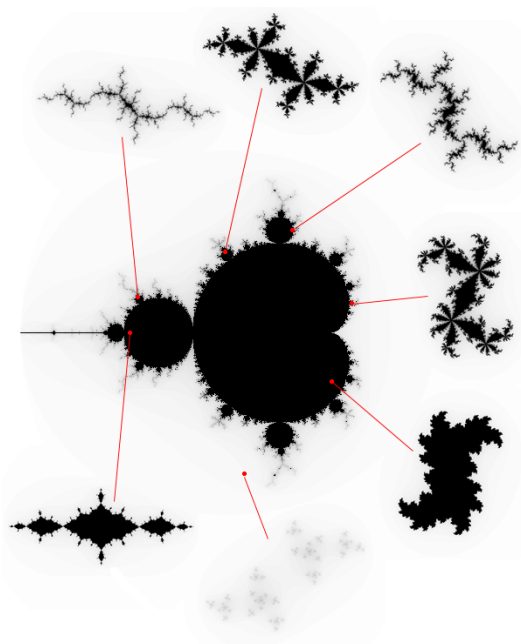


Fig.2.11. Conjuntos de Júlia encontrados em conjuntos de Mandelbrot.

Devido a sua complexidade, não se consegue desenhar manualmente conjuntos como o de Mandelbrot e os de Júlia (caso particular dos conjuntos de Mandelbrot). Nem mesmo o computador é capaz de traçá-los precisamente, mas apenas produzir uma aproximação tanto mais satisfatória quanto melhor seja a resolução da tela gráfica [7].

Ao analisar a cor do conjunto com detalhes e com o auxílio de um computador, observa-se sua complexidade ao longo das diversas escalas. Uma catalogação das diferentes imagens no seu interior ou uma descrição numérica no seu contorno exigiria uma quantidade infinita de informação. Podem ser formadas muitas formas fractais por processos iterativos no plano complexo, mas existe apenas um conjunto de Mandelbrot [13].

O principal elemento que o programa do conjunto de Mandelbrot necessita é um ciclo de instruções que a partir do seu número complexo inicial, é aplicada a sua regra aritmética. Para o conjunto de Mandelbrot, a regra é: $z \rightarrow z^2 + c$, onde z começa em zero e c é o número complexo correspondente ao ponto a ser calculado. Assim, multiplica-se z por ele próprio e soma-se ao número complexo c . O novo resultado é multiplicado por ele próprio e somado ao número inicial c [11], [13].

Para desenhar o conjunto de Mandelbrot, se atribui uma cor a um número complexo $a + ib$ qualquer, que irá ser desenhado como um ponto (a, b) no plano.

Define-se z como sendo o número anterior $(a + ib)$, submetendo-o ao seguinte processo iterativo [11]:

$$z_{n+1} = z_n^2 + w \quad (2.7)$$

em que w é um número complexo constante.

Observando o comportamento do módulo $|z_{n+1}|$, temos as seguintes possibilidades:

- Se $|z_n|$ mantém-se sempre finito, atribui-se à cor preta a z .
- Se $|z_n|$ tende para infinito, atribui-se diferentes cores a z , dependendo do comportamento de $|z_n|$. A classificação é definida por quem desenha o fractal.

O conjunto de Mandelbrot tem uma forma muito particular de auto-similaridade aproximada, existe uma repetição infinita do conjunto, mas também uma infinita variedade de formas ao redor desse conjunto se for ampliado o suficiente para a verificação. Efetuando diversas ampliações encontram-se diversas formas que fazem lembrar cavalos-marinho,

espiras, cobras, ondas ou plantas exóticas. Existe um número infinito de cópias do próprio conjunto numa diversidade impressionante de escalas. É a auto-semelhança como se pode observar pelas sucessivas ampliações do conjunto de Mandelbrot, mostrado na Fig. 2.12 [8], [13].

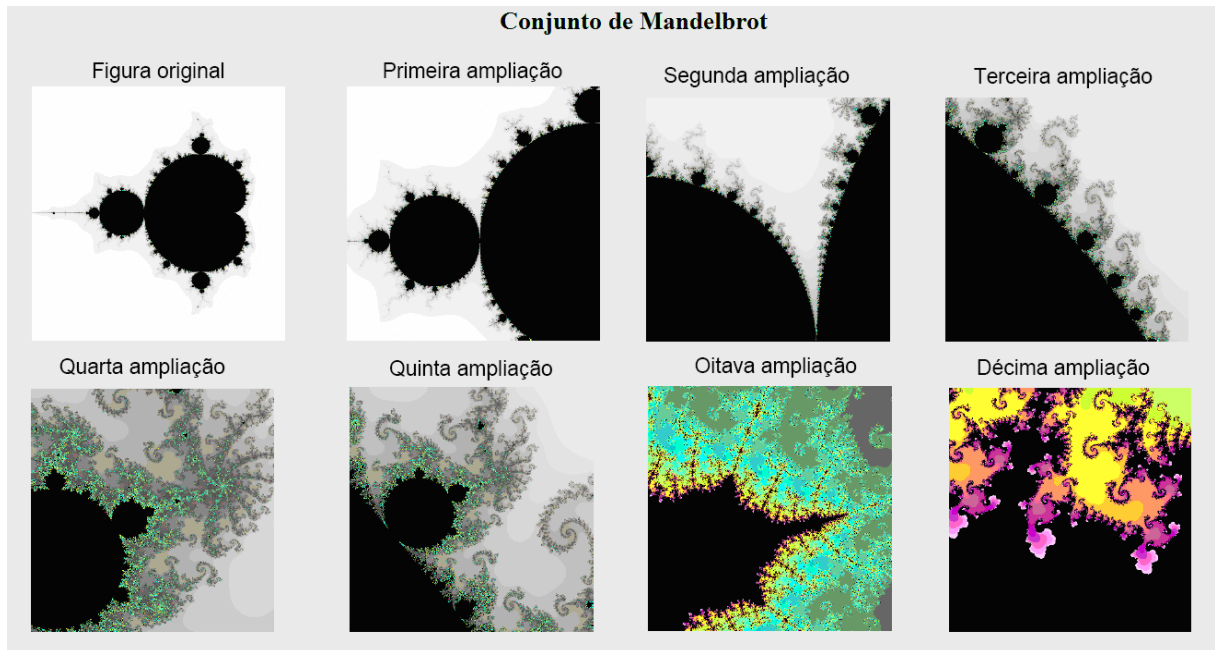


Fig. 2.12. Seqüência de ampliações do conjunto de Mandelbrot.

Em qualquer destas ampliações, são descobertas réplicas do conjunto de Mandelbrot original, rodeadas por novas e impressionantes imagens, que mudam infinitamente.

2.4 Métodos para a Geração de Fractais

Os fractais podem ser obtidos por vários métodos. Um destes métodos é o IFS (*Iterated Function System* - Sistema Iterativo de Funções) que foi desenvolvido em 1986, pelo matemático inglês Michael Barnsley, um dos pioneiros da ciência dos fractais. O método consiste na técnica de se construir figuras fractais através da repetição em escala de uma mesma figura. Outro método é o Sistema L que foi desenvolvido pelo biólogo alemão Aristid Lindenmeyer, que introduziu o conceito de autômatos celulares para descrever matematicamente os processos de crescimento de organismos constituídos por células.

2.4.1 Método IFS

O método IFS é baseado em transformações matemáticas, tais como: contração, reflexão, rotação e translação. A técnica consiste em selecionar uma figura inicial qualquer e aplicar iterativamente a ela uma série de transformações afins, em geral com redução de escala, gerando “cópias” menores da mesma imagem. Transformação afim é a soma de uma transformação linear com uma translação e, portanto é, geralmente, não-linear. Este procedimento é repetido infinitamente até se obter uma imagem composta de infinitas cópias cada vez menores da mesma imagem [8], [12].

Os fractais planos, por exemplo, são definidos como o limite do processo iterativo de um conjunto finito de transformações afins $w(\mathbf{u})$, que são aplicadas em uma figura plana inicial [4], [12]. Define-se a transformação afim $w(\mathbf{u}): \mathfrak{R}^2 \rightarrow \mathfrak{R}^2$ no plano através da expressão,

$$w(\mathbf{u}) = T(\mathbf{u}) + \mathbf{v} \quad (2.8)$$

em que, T é uma transformação linear não-singular, $\mathbf{u}^T = (x \ y)$ e \mathbf{v} são vetores do \mathfrak{R}^2 . A transformação afim $w(\mathbf{u})$ pode ser escrita, na forma matricial, como:

$$w(x, y) = \begin{pmatrix} a & c \\ b & d \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} e \\ f \end{pmatrix} \quad (2.9)$$

em que, os coeficientes a, b, c, d, e, f , são escalares. São exemplos de fractais gerados através do método IFS, a curva de Koch e o triângulo de Sierpinski (ver Fig.2.13).

A curva de Koch, ilustrada na Fig.2.13(a), é obtida a partir de uma reta através de quatro transformações $w_i: \mathfrak{R}^2 \rightarrow \mathfrak{R}^2$, da forma:

$$w_i \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} \cos(\theta_i) & -\sin(\theta_i) \\ \sin(\theta_i) & \cos(\theta_i) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} e_i \\ f_i \end{pmatrix} \quad (2.10)$$

em que, as variáveis θ_i, e_i e f_i assumem os valores dados na Tab.2.5. Estas quatro transformações fazem a contração de $1/3$; w_2 faz uma rotação de 60° e uma translação de uma

unidade para a direita; w_3 faz uma rotação de 300° , uma translação de $3/2$ unidades para a direita e $\sqrt{3}/2$ unidade para cima; w_4 faz uma translação de 2 unidades para a direita [4], [9], [12].

O triângulo de Sierpinski, ilustrado na Fig.2.13(b), é obtido a partir de um triângulo equilátero através de três transformações $w_i : \mathfrak{R}^2 \rightarrow \mathfrak{R}^2$, da forma:

$$w_i \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} e_i \\ f_i \end{pmatrix} \quad (2.11)$$

em que θ_i , e_i e f_i assumem os valores dados na Tab.2.5. Estas três transformações fazem a contração de $1/2$; w_2 faz uma translação de $1/2$ unidade para a direita; w_3 faz uma translação de $1/4$ unidade para a direita e $1/2$ unidade para cima. A cada conjunto de transformações o nível de escala do fractal é aumentado em uma unidade [4], [9], [12].

Tab.2.5. Escalares constantes das transformações

Triângulo de Sierpinski			Curva de Koch		
i	e_i	f_i	θ_i	e_i	f_i
1	0	0	0	0	0
2	$1/2$	0	$\pi/3$	1	0
3	$1/4$	$1/2$	$-\pi/3$	$3/2$	$\sqrt{3}/2$
4	—	—	0	2	0

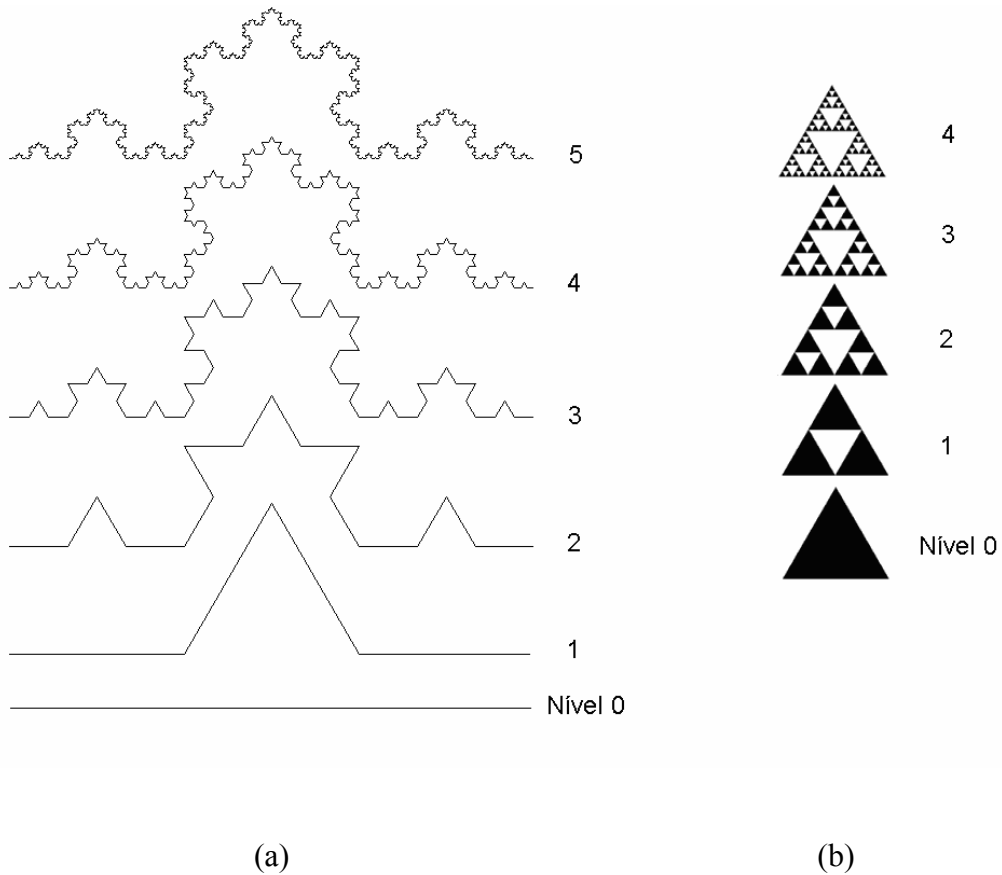


Fig.2.13. Fractais gerados pelo método IFS. Em destaque: (a) Curva de Koch, (b) Triângulo de Sierpinski

A Curva de Peano por sua vez, ilustrada na Fig.2.14, é obtida a partir de uma reta através de nove transformações $w_i : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^2$, com o fator de contração de $1/3$, da forma:

$$w_i \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} \cos \theta & -\text{sen} \theta \\ \text{sen} \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} e_i \\ f_i \end{pmatrix} \quad (2.12)$$

em que, as variáveis θ_i , e_i e f_i assumem os valores dados na Tab.2.6. Estas nove transformações fazem a contração de $1/3$; w_2 faz uma rotação de 90° e uma translação de uma unidade para a direita; w_3 uma translação de uma unidade para a direita e uma unidade para cima; w_4 faz uma rotação de 90° e uma translação de duas unidades para a direita; w_5 faz uma translação de uma unidade para a direita; w_6 faz uma rotação de 270° e uma translação de uma unidade para a direita; w_7 faz uma translação de uma unidade para a direita e uma unidade

para baixo; w_8 faz uma rotação de 270° e uma translação de duas unidades para a direita; w_9 faz uma translação de duas unidades para a direita [9], [12].

Tab.2.6. Escalares constantes das transformações para a curva de Peano

Curva de Peano									
i	1	2	3	4	5	6	7	8	9
θ_i	0	$\pi / 2$	0	$\pi / 2$	0	$-\pi / 2$	0	$-\pi / 2$	0
e_i	0	1	1	2	1	1	1	2	2
f_i	0	0	1	0	0	0	-1	0	0

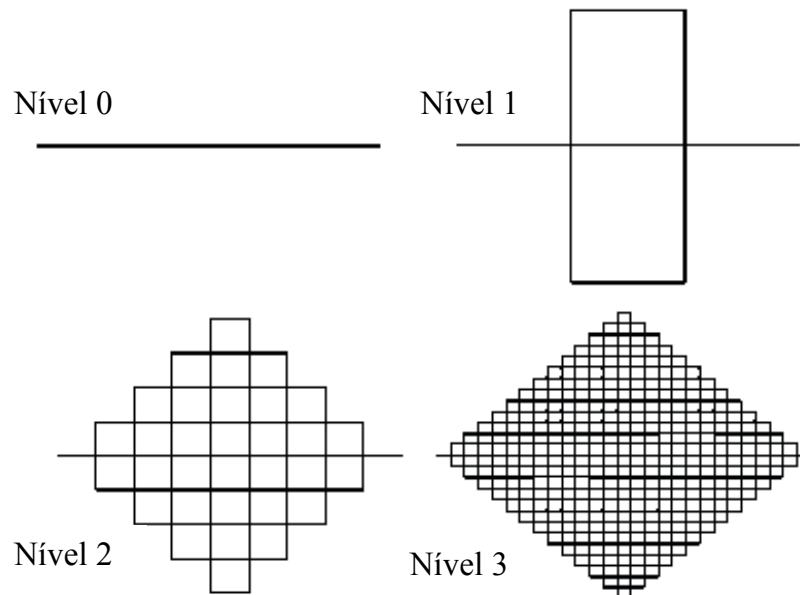


Fig.2.14. Curva de Peano gerada pelo método IFS.

2.4.2 Sistema L

Esse método foi introduzido devido ao conceito de autômatos celulares. Do ponto de vista matemático, um autômato é uma estrutura que evolui por si mesma, obedecendo a um conjunto de regras pré-determinadas. Para Lindenmeyer, criador do método, os autômatos celulares são estruturas constituídas de células que se proliferam como as células de um organismo vivo. Assim, para o estudo dos autômatos, o computador surge como um instrumento poderoso, podendo implementar as regras formativas em códigos de programação [9], [12].

O autômato inicia o seu processo evolutivo a partir de um conjunto simples de células, denominado por matriz. Esta matriz pode ser simplificada a uma única célula. Uma regra ou um conjunto de regras formativas aplicadas à matriz determina como uma célula é substituída por outro conjunto de células, determinando uma proliferação.

Um autômato consiste em três elementos [9]:

- Uma matriz;
- Um conjunto de regras formativas;
- Um limite de evolução.

Para a construção dos fractais não se trabalha com células, mas com elementos gráficos representados por letras do alfabeto. As regras formativas podem ser representadas por cadeias de caracteres, que vão armazenar toda a informação gráfica necessária para a construção do fractal.

Apesar do processo de geração dos fractais ser um processo infinito, a construção do mesmo será considerada até uma certa etapa, assim como as proliferações que se sucedem até um certo limite. Tendo toda a informação para construir o fractal, armazenada em uma cadeia de caracteres, faz-se a leitura desta cadeia transformando os caracteres em comandos gráficos que desenham o fractal na tela do computador. A representação dos comandos gráficos nas cadeias de caracteres ocorre da seguinte forma [9],[12], [13]:

- Segmentos serão denotados por letras maiúsculas do alfabeto;
- O sinal positivo (+) significa incremento positivo do ângulo, ou seja, mudança de direção no sentido horário;
- O sinal negativo (-) significa incremento negativo do ângulo, ou seja, mudança de direção no sentido anti-horário;

Para se construir a Curva de Koch utilizando o Sistema L, deve-se definir, primeiramente, a célula matriz. Em seguida, deve ser estabelecida a regra de formação que irá determinar como a cadeia de caracteres irá se proliferar, bem como, um limite n para esta proliferação, pré-estabelecendo até que etapa se deseja construir o fractal.

O passo inicial da construção da curva de Koch é desenhar um segmento de reta de comprimento unitário que representará a célula matriz, denotada por uma letra. Neste caso, escolhe-se “K”. O passo 2 é dividir esse segmento em três partes iguais, substituindo o segmento do meio por um triângulo equilátero sem a base, dando origem a um poligonal. O passo 3 da construção da curva de Koch é repetir o passo 2 com todos os segmentos da etapa anterior, assim, a regra de formação será: a cada etapa substitui-se cada letra K (célula) da

etapa anterior por “K-K++K-K” (conjunto de células novas), conservando os demais caracteres (- e +), e então, tem-se a seguinte proliferação da cadeia de caracteres [8], [9], [13]:

- Etapa 1: K;
 - Etapa 2: K - K + + K - K ;
 - Etapa 3: K - K + + K - K - K - K + + K - K + + K - K - K - K + + K - K ;
-
- Etapa n: K - K + + K - K - ... - K - K + + K - K . (tantas cadeias K - K + + K - K quanto o número de letras “K”, da etapa anterior).

Observa-se abaixo, o algoritmo de construção da curva de Koch pelo Sistema L, considerando o limite de proliferação n [9]:

Algoritmo1: Construção da curva de Koch

```

matriz = K
regra = K - K + + K - K
replica = “(vazio)”
fonte = matriz
k = 1
REPITA (enquanto  $k \leq n$ )
    REPITA COM CADA CARACTERE DA FONTE
        Se caractere = K, então
            replica = replica & regra
        senão
            replica = replica & caractere
    fonte = replica
    replica = “(vazio)”
    k = k + 1

```

A cada etapa, o algoritmo analisa os caracteres da cadeia fonte um a um. Se o caractere for “K”, então ele será substituído por “K - K + + K - K”. Se for “+” ou “-”, o caractere será mantido. Uma vez gerada a cadeia fonte na etapa n , resta então fazer a sua

leitura, convertê-la em comandos gráficos e desenhar o fractal na tela do computador. O algoritmo a seguir descreve este processo [9]:

Algoritmo 2: Interpretação gráfica da cadeia de caracteres

Dado: cadeia fonte final da curva de Koch e limite de proliferação n do algoritmo 1.

Ponto inicial $(x_0; y_0)$;

$$\theta = \pi/2 ;$$

$$d\theta = \pi/3 ;$$

$$d = (1/3)^n .$$

$$x = x_0$$

$$y = y_0$$

REPITA COM CADA CARACTERE DA CADEIA

Se o caractere for “K”, então

$$nx = x + d \operatorname{sen} \theta$$

$$ny = y + d \cos \theta$$

Trace um segmento de extremidades $(x; y), (nx; ny)$

$$x = nx$$

$$y = ny$$

Se o caractere for “+”, então

$$\theta = \theta + d\theta$$

Se o caractere for “-”, então

$$\theta = \theta - d\theta ;$$

Próximo caractere

Cada incremento de ângulo $d\theta$, tanto no sentido horário quanto no sentido anti-horário, é de 60° ou $\pi/3$ rad, devido a se trabalhar com um triângulo equilátero. Parte-se de um ponto $(x_0; y_0)$, como o comprimento de cada segmento da curva na etapa n é $d = 1/3^n$, as coordenadas do novo ponto serão:

$$(x_0 + d \operatorname{sen} \theta, y_0 + d \cos \theta),$$

onde θ é o ângulo que direciona o segmento.

A Fig. 2.15 representa o resultado da curva de Koch a partir do Sistema L com limite de proliferação, n , de 1 à 6, através de um programa executado em Matlab 7. O programa segue em anexo.

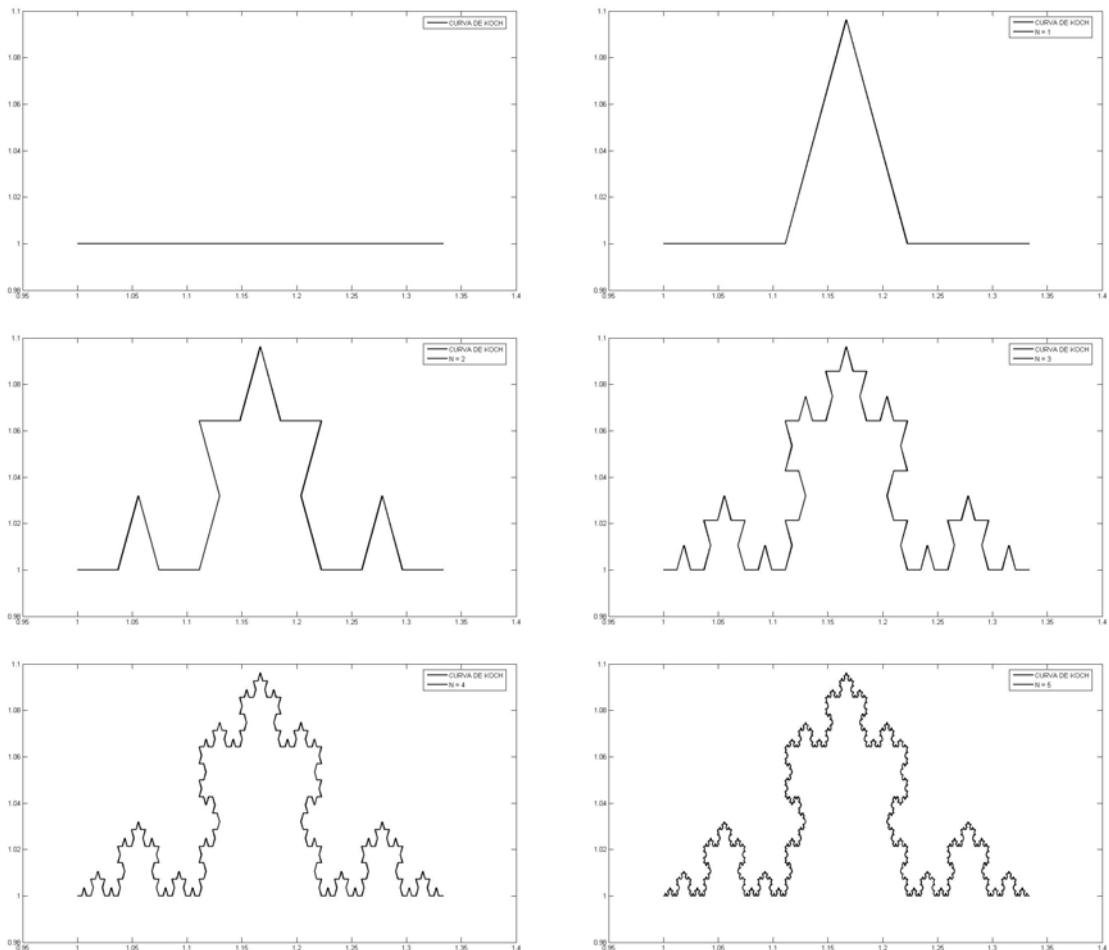


Fig.2.15. Resultado da curva de Koch a partir do Sistema L.

O floco de neve de Koch, como já foi explicado no tópico 2.3.2, difere da curva de Koch apenas pela figura inicial, que no caso do floco é um triângulo equilátero. Então, para a construção deste fractal, basta substituir a matriz inicial por $K++K++K$ [9], [12].

A Figura 2.16 abaixo, representa o resultado do floco de neve a partir do Sistema L com limite de proliferação, n , de 1 à 6, através de um programa executado em Matlab 7. O programa segue em anexo.

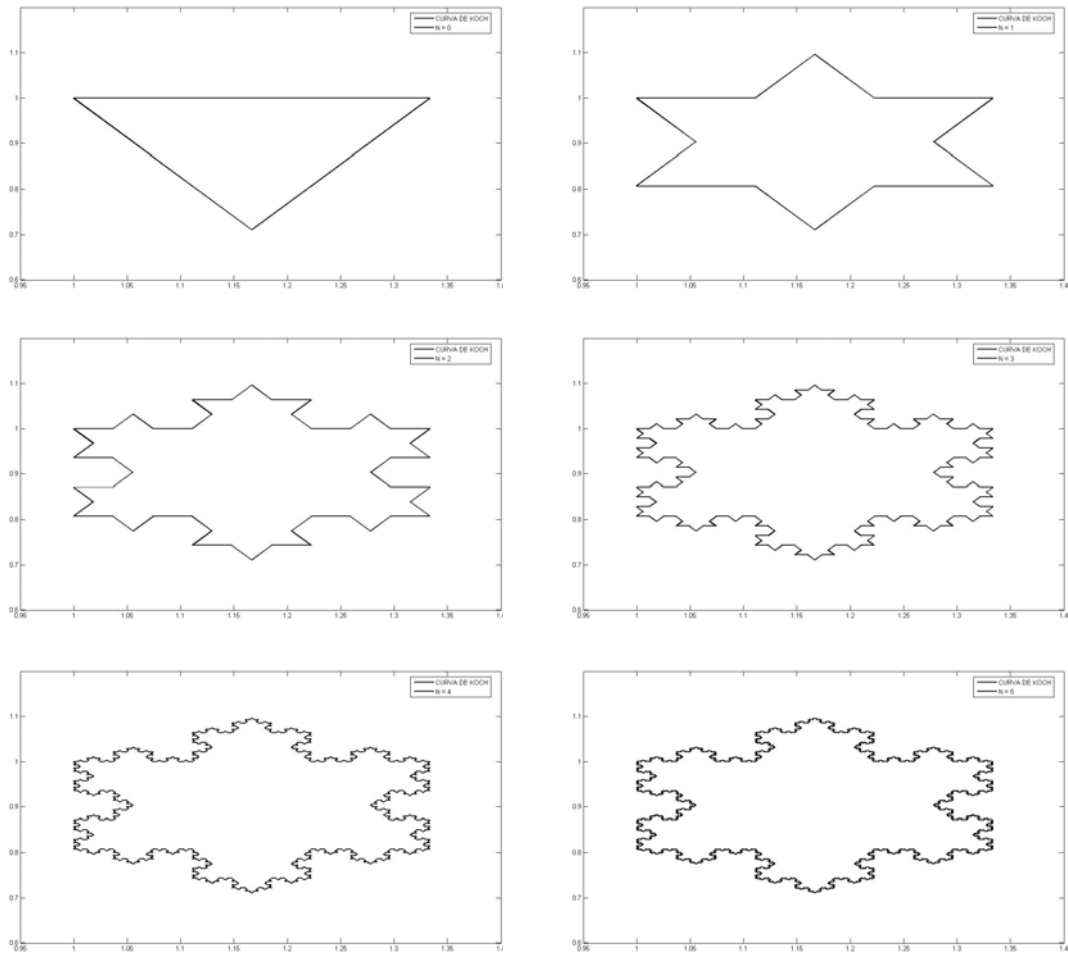


Fig.2.16. Resultado do floco de neve de Koch a partir do Sistema L.

Pode-se questionar a respeito de não se definir a matriz inicial como $K--K--K$, sabendo que dará um triângulo equilátero como figura inicial. A resposta para esta questão se deve as curvas de Koch estarem voltadas para dentro do triângulo inicial, formando assim, uma figura extremamente diferente [9], [12]. A Fig.2.17, mostra a evolução das etapas de construção nesse caso.



Fig.2.17. Etapas iniciais da construção da ilha de Koch com matriz $K--K--K$.

2.5 Síntese do Capítulo

Neste capítulo foram apresentados os principais conceitos relacionados aos fractais, tais como: suas características; os tipos de fractais mais utilizados; e os métodos de geração das estruturas fractais (Método IFS e Sistema L). Dentre as principais características, foram discutidas: estrutura fina, auto-similaridade, simplicidade na lei de formação e dimensão fractal. Com relação aos tipos de fractais, foram apresentados: a curva de Koch, o floco de neve de Koch, a curva de Peano, o triângulo de Sierpinski, e os conjuntos de Mandelbrot. Para cada tipo de fractal, discutiu-se a construção geométrica, bem como as características dos mesmos.

Capítulo 3

Antenas Planares de Microfita

3.1 Introdução

As antenas planares de microfita surgiram com a evolução da tecnologia de circuitos integrados de microondas, havendo a necessidade de se desenvolver dispositivos planares para aplicações em sistemas de comunicações que exijam estruturas simplificadas, com baixo custo de fabricação.

As antenas de microfita foram propostas em 1953 por *Deschamps*, nos Estados Unidos e por *Gutton e Baissinot* em 1955, na França. A partir da década de 70, por meio de *Howell e Munson*, foram fabricadas as primeiras antenas de utilização prática, devido ao aprimoramento de modelos teóricos e ao surgimento de substratos com propriedades mais atrativas e baixa tangente de perdas [14].

Este capítulo apresenta a fundamentação teórica das antenas planares de microfita, ressaltando sua estrutura e características gerais, como as possíveis geometrias do *patch* condutor, os substratos utilizados, as vantagens e desvantagens destas antenas, além de algumas aplicações. São descritos os principais métodos de alimentação, com um maior enfoque na alimentação por meio de linha de microfita, uma vez que é o método utilizado nas antenas fractais desenvolvidas. Também, são apresentados brevemente, os modelos de análise existentes para antenas de microfita.

3.2 Estrutura e Características

De modo geral, uma antena de microfita, em sua forma mais simples, consiste de uma fina camada metálica (*patch*), que atua como elemento irradiador, separada de seu plano de terra por um substrato dielétrico. A Fig.3.1 abaixo, mostra a estrutura de uma antena de microfita adaptada de [14]:

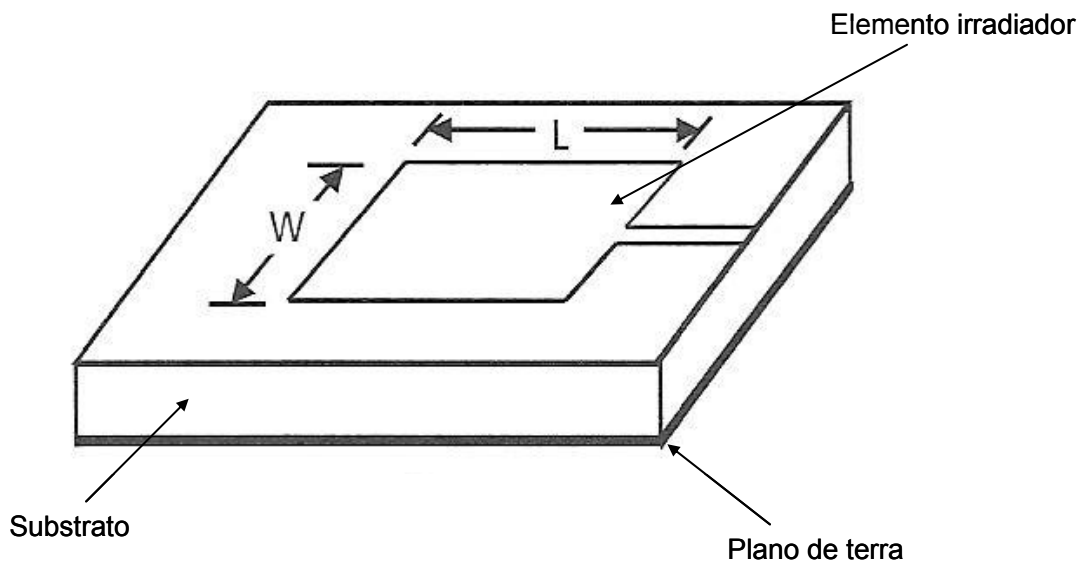


Fig.3.1. Antena de microfita com *patch* retangular.

O comprimento L do *patch* retangular para o modo fundamental de excitação TM_{10} é ligeiramente menor que $\lambda/2$, sendo λ o comprimento de onda no dielétrico e λ_0 o comprimento de onda no espaço-livre, determinado como $\lambda_0/\sqrt{\epsilon_{eff}}$ (ϵ_{eff} é a constante dielétrica efetiva da linha de microfita de largura w). O valor de ϵ_{eff} é ligeiramente menor que a constante dielétrica do substrato, ϵ_r , uma vez que o campo espalhado também se propaga no ar, não sendo confinado apenas no dielétrico. Quando se aumenta a largura W do *patch* ou a espessura h do substrato, diminuindo seu ϵ_r , haverá um maior acoplamento de energia por ondas de superfície [14], [15].

O *patch* pode assumir qualquer geometria, entretanto, para fins de simplificação, geralmente são utilizadas formas geométricas regulares, tais como: quadrada, circular, elíptica, triangular e anel, porém, estruturas mais complexas, como os fractais, também estão sendo bastante utilizadas na fabricação de antenas de microfita com aplicações diversificadas [15], [16]. O material condutor normalmente utilizado é o cobre. A Fig.3.2 apresenta algumas formas de representação para os elementos de *patch* de microfita, baseadas em [15].

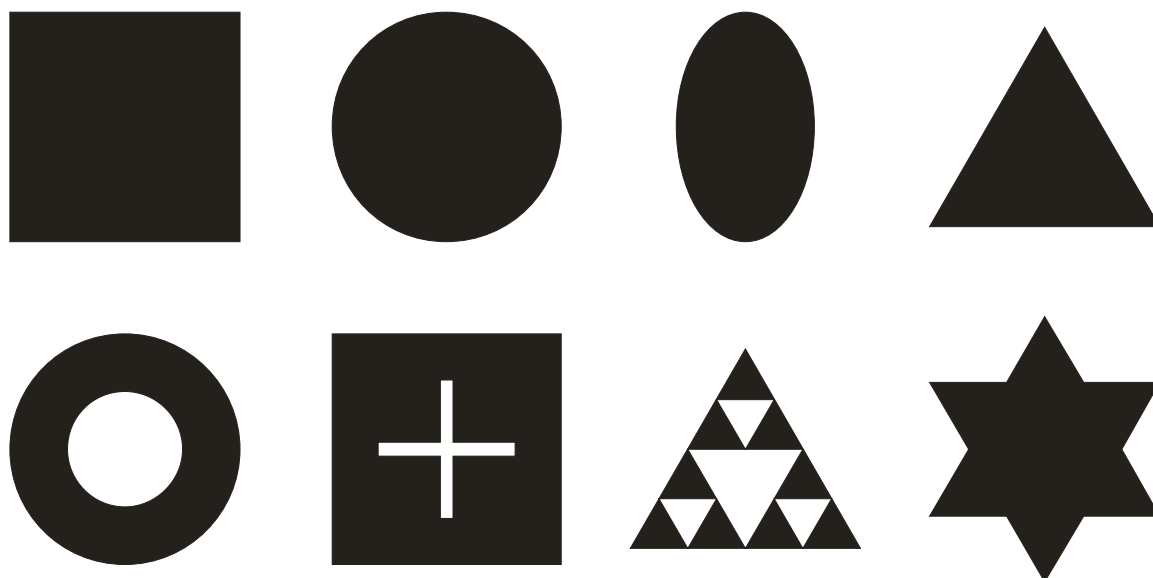


Fig.3.2. Formas de representação dos elementos de *patch* de microfita.

A alimentação do *patch* pode ser feita de várias maneiras, sendo as mais comuns através de: cabo coaxial, linha de microfita, acoplamento eletromagnético, acoplamento por abertura (ver tópico 3.3).

Os materiais utilizados como substratos em projetos de antenas planares são, geralmente, materiais dielétricos isotrópicos, dielétricos anisotrópicos e ferrimagnéticos. Os substratos mais comuns utilizados apresentam constante dielétrica na faixa de $2 \leq \epsilon_r \leq 10$, sendo que, valores mais baixos resultam em uma maior eficiência e largura de banda, contudo, consomem mais material na fabricação, por serem mais espessos. Substratos mais finos, com altas permissividades dielétricas, são vantajosos por conseguir dimensões de elementos menores, mas apresentam maiores perdas devido à concentração de linhas de campo ser maior no substrato que no ar [16], [17].

Vários tipos de antenas planares podem ser utilizadas em sistemas de comunicação sem fio, assim como as antenas de microfita. Elas possuem características, que quando comparadas com as características provenientes de uma antena convencional de microondas, podem apresentar vantagens e desvantagens [16-18]. Dentre as vantagens apresentadas, observa-se:

- Dimensão e peso reduzidos;
- Baixo custo;
- Fácil montagem no terminal móvel;
- Diversidade de formas;
- A polarização pode ser tanto circular quanto linear;
- Várias formas de polarização e diagramas de radiação;
- Linhas de alimentação e redes casadas são construídas simultaneamente com a estrutura das antenas.

Com relação às desvantagens que devem ser levadas em consideração durante a escolha do melhor tipo de antena a ser construída, podem ser citadas [16], [17]:

- Largura de banda estreita e baixa eficiência de irradiação se construídas em substratos com constantes dielétricas elevadas;
- Possibilidade de excitação por ondas de superfície;
- Irradiação em apenas um hemisfério;
- Baixo ganho (≈ 6 dB).

As antenas de microfita podem ser facilmente aplicáveis em diversos sistemas e equipamentos como mostra a Tab.3.1 a seguir [19].

Tab.3.1. Algumas aplicações de antenas de microfita

Plataforma	Sistemas
Aeronave	Radar, comunicações, navegação, altímetro, sistemas de aterrissagem
Projéteis	Radar, telemetria
Satélites	Comunicações, transmissão direta de TV, radares remotos sensíveis e radiômetro
Navios	Comunicações, radar, navegação
Veículos de terra	Celular, rádio móvel
Outros	Sistemas biomédicos, alarmes de intruso

3.3 Métodos de Alimentação

Os primeiros métodos de alimentação utilizados foram por linhas de microfita ou por ponta de prova conectada ao plano de terra (cabo coaxial). Porém, outras técnicas têm sido desenvolvidas, tais como, a alimentação por acoplamento eletromagnético, e a alimentação de acoplamento por abertura.

Para a escolha do método de alimentação, devem ser observados fatores importantes, como o casamento de impedâncias entre o *patch* e a alimentação, e formas de minimizar a radiação espúria e seus efeitos no diagrama de radiação [18].

As antenas de microfita podem ser alimentadas de forma direta por cabo coaxial ou por linha de microfita, e indiretamente, através das técnicas de acoplamento eletromagnético e acoplamento por abertura. Na alimentação indireta, não há nenhum contato metálico direto entre a linha de alimentação e o *patch* [17].

A seguir, serão descritas as formas mais comuns de alimentação em antenas de microfita

3.3.1 Alimentação por Linha de Microfita

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 microondas. Neste tipo de alimentação, obtém-se um casamento de impedância mais facilmente, uma vez que a impedância característica da linha pode ser controlada ao se ajustar a largura da fita condutora sobre um substrato dielétrico de espessura definida. 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 [14], [17], [18]. A Fig.3.3 abaixo, proposta em [19], exemplifica a alimentação através de linha de microfita.

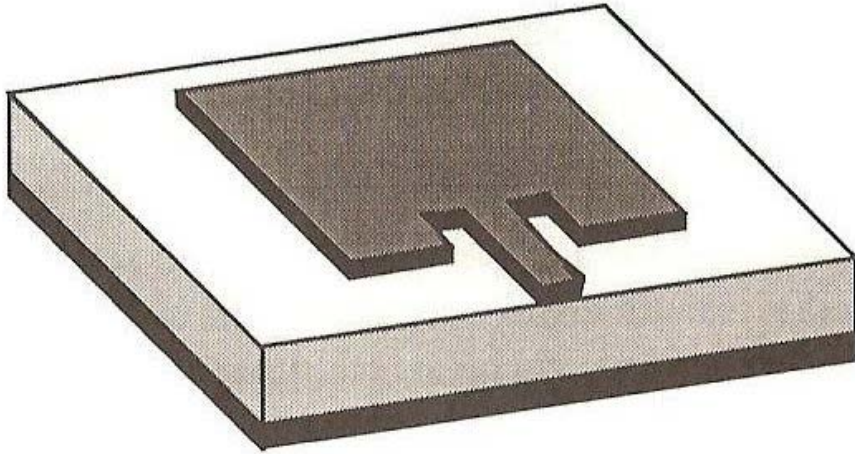


Fig.3.3. Geometria de antena alimentada por linha de microfita.

As dimensões das linhas de microfita podem ser obtidas por meio de modelos clássicos. Abaixo, pode-se observar o cálculo da impedância característica em (3.1) e da permissividade relativa efetiva em (3.2).

Quando $w/h < 1$, sendo w é a largura da linha, h a espessura do substrato e Z_0 a impedância característica em função de w/h , tem-se:

$$Z_0 = \frac{60}{(\epsilon_{eff})^{1/2}} \ln\left(\frac{8h}{w} + 0,25\frac{w}{h}\right) \quad (3.1)$$

onde,

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[\left(1 + \frac{12h}{w}\right)^{-1/2} + 0,041\left(1 - \frac{w}{h}\right)^2 \right] \quad (3.2)$$

Para $w/h \geq 1$,

$$Z_0 = \frac{120\pi}{(\epsilon_{eff})^{1/2}} \frac{1}{\left[\frac{w}{h} + 1,393 + 0,667 \ln\left(\frac{w}{h} + 1,4444\right) \right]}, \quad (3.3)$$

em que,

$$\varepsilon_{eff} = \frac{\varepsilon_r + 1}{2} + \frac{\varepsilon_r - 1}{2} \left(1 + 12 \frac{h}{w} \right)^{-1/2} \quad (3.4)$$

Para $A < 1,52$,

$$\frac{w}{h} = \frac{8 \exp(A)}{\exp(2A) - 2} \quad (3.5)$$

Já para $A \geq 1,52$,

$$\frac{w}{h} = \frac{2}{\pi} \left\{ B - 1 - \ln(2B - 1) + \frac{\varepsilon_r - 1}{2\varepsilon_r} \left[\ln(B - 1) + 0,39 - \frac{0,61}{\varepsilon_r} \right] \right\} \quad (3.6)$$

sendo A e B dados por:

$$A = \frac{Z_0}{60} \left(\frac{\varepsilon_r + 1}{2} \right)^{1/2} + \frac{\varepsilon_r - 1}{\varepsilon_r + 1} \left(0,23 + \frac{0,11}{\varepsilon_r} \right) \quad (3.7)$$

$$B = \frac{377\pi}{2Z_0(\varepsilon_r)^{1/2}} \quad (3.8)$$

A faixa de valores práticos para a impedância característica de uma linha de microfita situa-se entre 20Ω e 120Ω ; a faixa de valores da constante dielétrica dos substratos utilizados, em geral, está entre 2 e 10; e as espessuras típicas para o substrato são 0,835 mm e 1,587 mm [17].

3.3.2 Alimentação por Cabo Coaxial

Na alimentação por meio de cabo coaxial, o condutor interno de um cabo é conectado diretamente ao *patch* e o condutor externo é conectado ao plano de terra, através de uma perfuração no substrato. Esta operação requer uma manipulação cuidadosa, uma vez que o controle mecânico da conexão é difícil, especialmente em frequências muito altas [19].

O casamento de impedâncias pode ser obtido facilmente, ocorrendo de acordo com a localização do cabo. Entretanto, este tipo de alimentação, apresenta difícil modelagem e fabricação em substratos espessos, devido à perfuração do substrato, além de fornecer resultados de banda estreita [18], [19]. A Fig.3.4 apresenta um exemplo de antena de microfita alimentada por cabo coaxial [19].

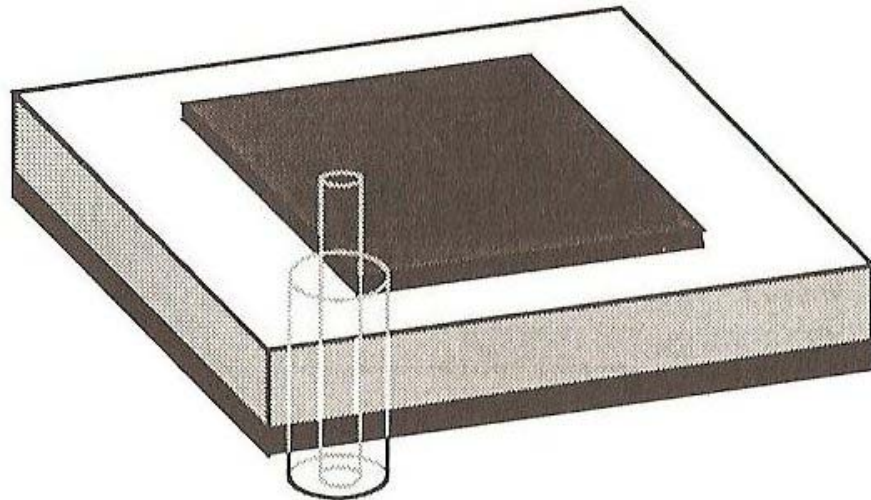


Fig.3.4. Geometria de antena alimentada por cabo coaxial.

3.3.3 Alimentação por Acoplamento Direto

Na técnica de alimentação por acoplamento direto, posiciona-se a linha de alimentação entre o *patch* e o plano de terra, separados através de duas camadas dielétricas. Devido à utilização de dupla camada dielétrica, resultando no aumento da espessura total do substrato, esta técnica possibilita alcançar maiores larguras de banda, além de proporcionar pouca radiação espúria. Estas camadas dielétricas podem apresentar espessuras diferentes, podendo ser analisadas de modo individual, porém, precisam ser alinhadas corretamente e apresentam uma maior dificuldade durante a fabricação da antena [14], [17], [19]. Na Fig.3.5 pode-se observar uma antena alimentada por meio de acoplamento direto.

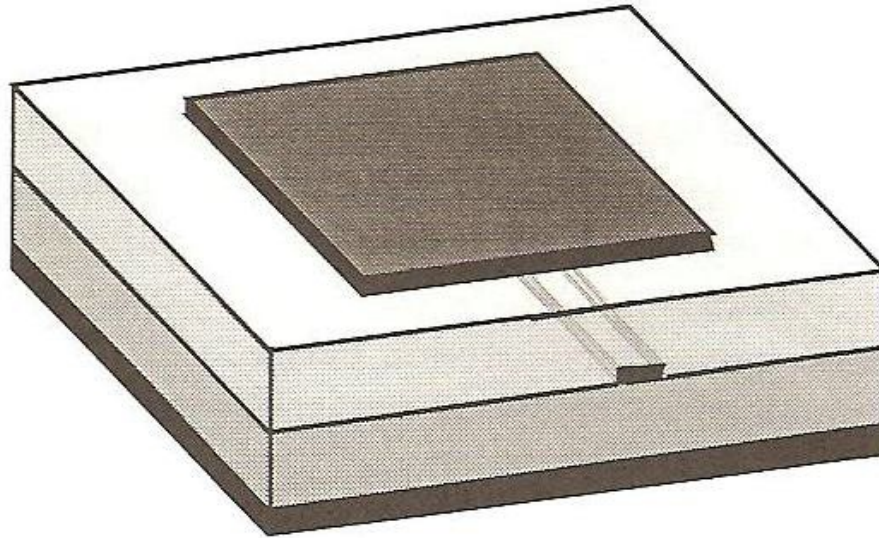


Fig.3.5. Geometria de antena alimentada por acoplamento direto.

3.3.4 Alimentação de Acoplamento por Abertura

A técnica de acoplamento por abertura é mais complexa no que diz respeito à construção, porém, causa pouca radiação espúria devido à utilização de duas camadas dielétricas. Consiste basicamente em um plano de terra com abertura, posicionado entre dois substratos dielétricos. Semelhante a técnica de acoplamento eletromagnético, podem ser escolhidos parâmetros individuais para cada camada. No lado inferior do substrato posicionado embaixo, há uma linha de microfitas que apresenta sua energia acoplada ao *patch* através desta fenda existente no plano de terra. Esta fenda (abertura) normalmente é centrada abaixo do *patch*. O quanto será acoplado da linha de alimentação ao *patch* dependerá da forma, do tamanho e do local da abertura [17-19]. A Fig.3.6 apresenta um exemplo de antena alimentada através de acoplamento por abertura [19].

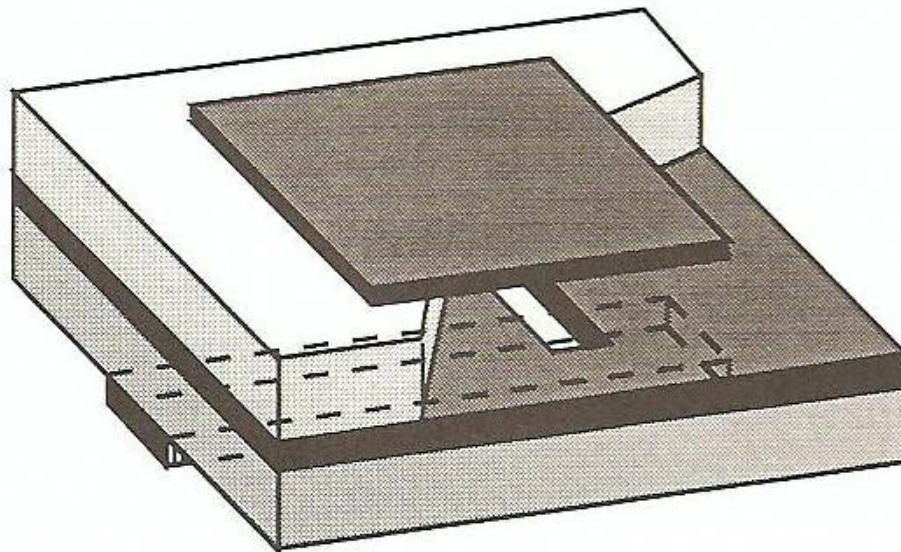


Fig.3.6. Geometria de antena alimentada através de acoplamento por abertura.

3.4 Modelos de Análise

Existem diversos métodos utilizados para a caracterização e modelamento das antenas de microfita, destacando-se os modelos aproximados e os modelos de onda completa.

Os modelos aproximados, semelhante a antenas de abertura, baseiam-se na distribuição de corrente magnética equivalente ao redor da borda do campo [14]. Apresentam algumas simplificações no que diz respeito ao mecanismo de radiação da antena, sendo precisos até determinada frequência. À medida que a frequência aumenta, a precisão no desempenho da antena é reduzida, principalmente na faixa de frequências correspondente a ondas milimétricas. Estes modelos não consideram fenômenos como a propagação de ondas de superfície e a dispersão, porém, são utilizados como solução inicial em um problema de projeto [19-21].

Dentre os modelos aproximados reportados na literatura, destacam-se [17], [19], [20]:

- Modelo da linha de transmissão: é o mais simples, sendo adequado para análise de antenas de microfita com *patch* retangular ou quadrado. Para outras geometrias torna-se inviável. Possibilita a determinação de diversos parâmetros da antena, como a frequência de ressonância, o diagrama de radiação e a impedância de entrada;

- Modelo da cavidade: pode ser empregado em antenas com *patches* de qualquer geometria. A antena é considerada como uma cavidade, apresentando paredes elétricas ao seu redor (no topo e na base), e paredes magnéticas nos contornos laterais.

Os modelos de onda completa estão baseados na distribuição de corrente elétrica no condutor do *patch* e no plano de terra [14]. Apresentam rigorosas formulações matemáticas e um maior esforço computacional e analítico, porém, fornecem resultados mais precisos, inclusive em altas frequências. Estes modelos são aplicáveis nos seguintes métodos:

- Método dos momentos (MoM – *Method of Moments*);
- Método dos elementos finitos (FEM – *Finite-Element Method*);
- Técnica de domínio espectral (SDT – *Spectral Domain Technique*);
- Método das diferenças finitas no domínio do tempo (FDTD – *Finite-Difference Time Domain*);

Este trabalho apresenta como método de análise das antenas fractais trabalhadas, simulações através do programa comercial *Ansoft HFSS*, que utiliza como princípio de funcionamento, o método dos elementos finitos (FEM). Este método é satisfatório para configurações volumétricas e envolve integração de funções de base em cima do *patch* condutor, que é dividido em várias subseções.

3.5 Síntese do Capítulo

Neste capítulo foi apresentada a fundamentação teórica a respeito das antenas planares de microfita, bem como, seus parâmetros principais para projeto e construção das mesmas, como: forma e dimensões do *patch*; tipo de substrato mais adequado; vantagens e desvantagens destas antenas; aplicações; técnica de alimentação a ser utilizada de acordo com a configuração e a aplicação desejadas; e breve explanação sobre os modelos de análise.

Capítulo 4

Monopolos de *Patch* Quase-fractal

4.1 Introdução

Neste capítulo, efetua-se uma investigação teórica e experimental das propriedades de monopolos de microfita com *patches* quase-fractais, apresentando diferentes níveis, para aplicações em sistemas de comunicações móveis. São monopolos condutores cujos planos de terra apresentam-se limitados ou truncados, de acordo com a estrutura proposta em [5]. Esses truncamentos existentes nos planos de terra são representados por cortes lineares onde é acrescentado um recorte retangular na região abaixo da linha de microfita de alimentação. Essa estrutura proposta foi considerada como referência para a realização da investigação experimental, e o software comercial *Ansoft* HFSS foi utilizado no processo de simulação das antenas.

O objetivo principal é modificar a configuração do *patch* do monopolo proposto em [5] através da aplicação da geometria fractal de Koch (níveis 1 e 2), a fim de limitar a sua largura de banda. Após a aplicação da geometria fractal no monopolo de nível 0, este torna-se uma estrutura quase-fractal, devido a sua alimentação ocorrer por meio de linha de microfita, quebrando a fractalidade.

São mostradas as curvas simuladas e medidas da perda de retorno e do SWR, em função da frequência, para os monopolos trabalhados. Também são observados os resultados simulados da Carta de *Smith* e dos diagramas de radiação 2D e 3D para as antenas de *patch* quase-fractal com diferentes níveis.

4.2 Geometrias Consideradas

A geometria de monopolo considerada como ponto de partida nesta experimentação, baseia-se na estrutura proposta em [5] e está representada na Fig.4.1 abaixo. Porém, depois de realizada a inserção da geometria fractal de Koch, nível 1, obtém-se a estrutura quase-fractal representada em Fig.4.2. Os monopolos construídos para o nível 2, seguem o mesmo princípio de construção geométrica dos monopolos de nível 1. Como antenas de microfita, todos os protótipos trabalhados são constituídos por *patches* condutores depositados sobre substratos

dielétricos, e apoiados sobre planos de terra. As espessuras dos *patches* condutores, as perdas dielétricas e condutoras são desprezadas. O substrato dielétrico é considerado isotrópico, com permissividade elétrica relativa ϵ_r e espessura h .

O *patch* condutor representado na Fig.4.1 tem comprimento b e largura a . Os *patches* são alimentados por uma linha de microfita de 50Ω , com comprimento l , introduzida no mesmo plano do *patch*. A largura da microfita de alimentação é representada por w , e a distância vertical do ponto de conexão da microfita com o *patch* ao plano horizontal de indicação do truncamento do plano de terra é representado por g . As dimensões do recorte retangular α e β são medidas, respectivamente, ao longo do truncamento do plano de terra e na direção da linha de microfita [17], [22], [23].

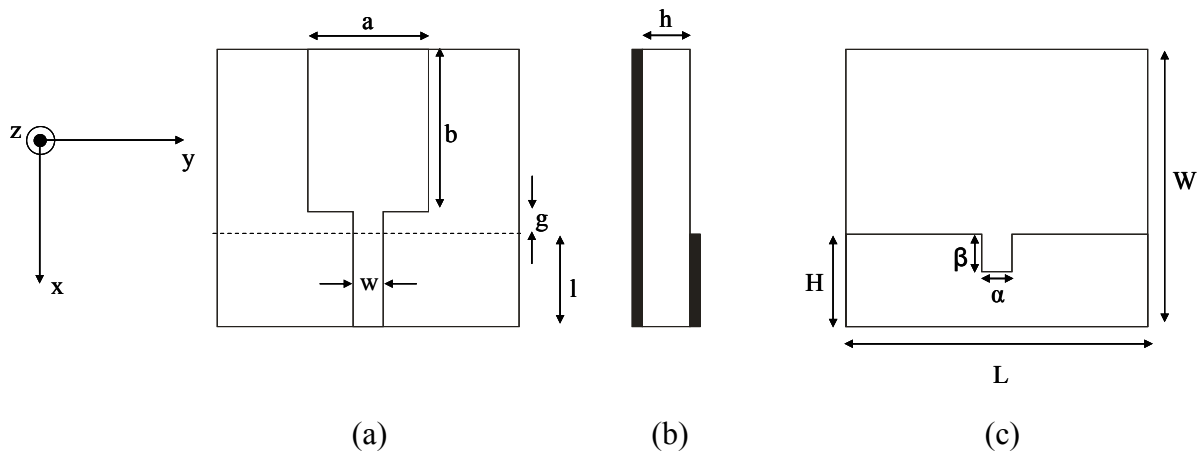


Fig. 4.1. Geometria de monopolo de microfita com *patch* retangular (nível 0). Em destaque: (a) *patch* condutor, (b) vista lateral da placa, (c) plano de terra.

O *patch* condutor representado na Fig.4.2 apresenta uma configuração fractal de Koch com os respectivos fatores de redução $b/3$ e $a/4$ situado nas laterais do *patch* e $b/4$ e $a/3$ nos lados inferior e superior do mesmo. Com a aplicação do fractal na estrutura de nível 0, observa-se o surgimento de um *inset*, cujo comprimento está referenciado na Fig.4.2 abaixo, como Y_0 . Os monopolos apresentam medidas correspondentes à placa e ao plano de terra semelhantes à estrutura de nível 0 (*patch* retangular).

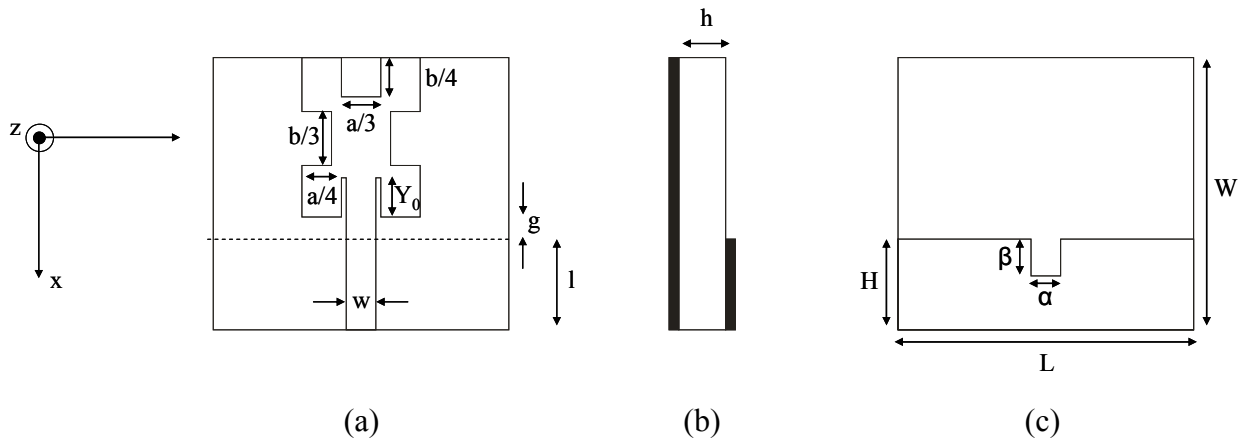


Fig. 4.2. Geometria de monopolo com *patch* quase-fractal de Koch de nível 1. Em destaque: (a) *patch* condutor, (b) vista lateral da placa, (c) plano de terra.

4.3 Projeto e Análise dos Monopolos

Na investigação experimental, foram usadas placas de fibra de vidro cobreadas nas duas faces. A espessura da camada dielétrica h é 1,5 mm e a permissividade elétrica relativa ϵ_r é 4,4. Foram simulados, construídos e medidos protótipos com o mesmo substrato dielétrico. Foram considerados monopolos fractais de Koch com níveis 0, 1 e 2.

Os parâmetros estruturais principais para os monopolos retangulares de nível 0 de acordo com a geometria proposta na Fig. 4.1 são: $a = 12$ mm, $b = 16,5$ mm, $l = 11,5$ mm, $g = 1,5$ mm, $w = 3$ mm, $H = 10$ mm, $L = 30$ mm, $W = 28$ mm, $\alpha = 3$ mm e $\beta = 4$ mm. Para as antenas fractais de níveis superiores são considerados os mesmos valores dos parâmetros estruturais referentes ao monopolo de nível 0.

Nas medições, foi utilizado um analisador de redes vetorial dos laboratórios do CEFET-PB (Fig.4.3), do fabricante *Agilent Technologies*, modelo N5230A PNA-L, atuando na faixa de 300 KHz a 13,5 GHz, para a obtenção da perda de retorno e do SWR em função da frequência. Os resultados medidos são comparados com os resultados obtidos com o *software Ansoft HFSS*, cujas simulações foram realizadas na faixa de 100 MHz a 14 GHz.

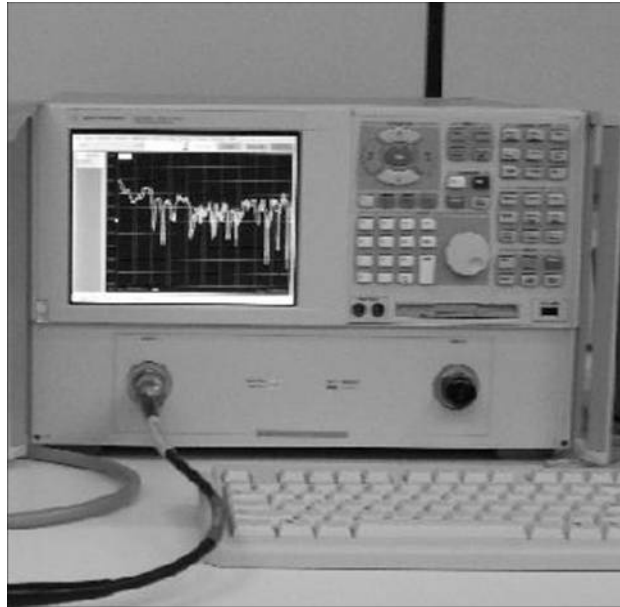
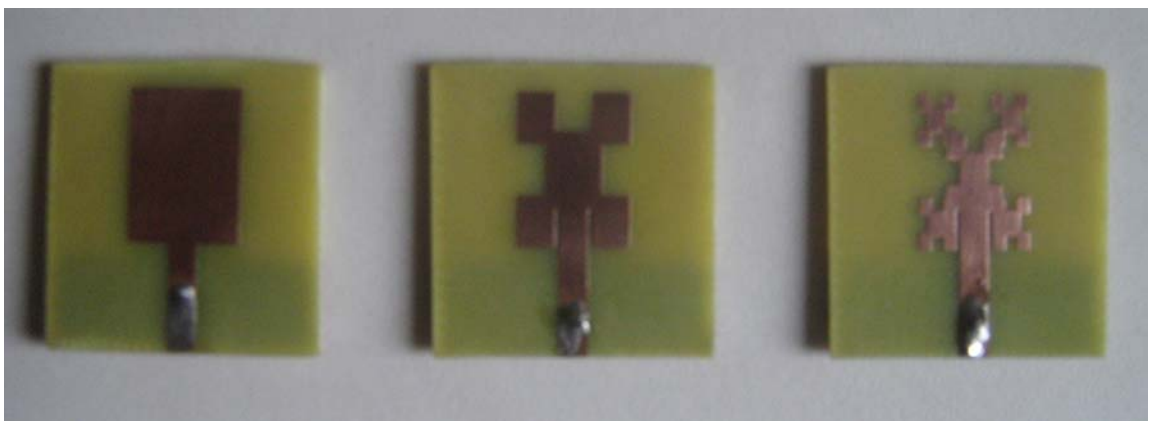


Fig.4.3. Analisador de Redes Vetorial.

4.3.1 Monopolos Quase-fractais com Diferentes Níveis

A Fig.4.4 ilustra as estruturas construídas após a corrosão. Observa-se as estruturas com diferentes níveis para o fractal de Koch, apresentando plano de terra truncado (monopolo) com a inserção do recorte retangular.



(a)



(b)

Fig. 4.4. Monopolos de microfita com *patches* quase-fractais de Koch e diferentes níveis. As fotos destacam: (a) os *patches* condutores correspondentes aos monopolos de níveis 0, 1 e 2, respectivamente, da esquerda para a direita; (b) os planos de terra.

Na Fig.4.5, o resultado simulado da perda de retorno mostra que o monopolo de *patch* retangular (nível 0), apresenta uma largura de banda de 9,6 GHz na faixa de 2,7 a 12,3 GHz. Para o resultado medido, a largura de banda é de 8,7 GHz na faixa de 3,7 a 12,4 GHz. Os valores medidos oscilam em torno de -15 dB na maior parte da faixa medida. Já na Fig.4.6, pode-se observar que os resultados simulado e medido apresentam uma boa concordância, com valores oscilando abaixo de 2 na maior parte da faixa de frequência considerada.

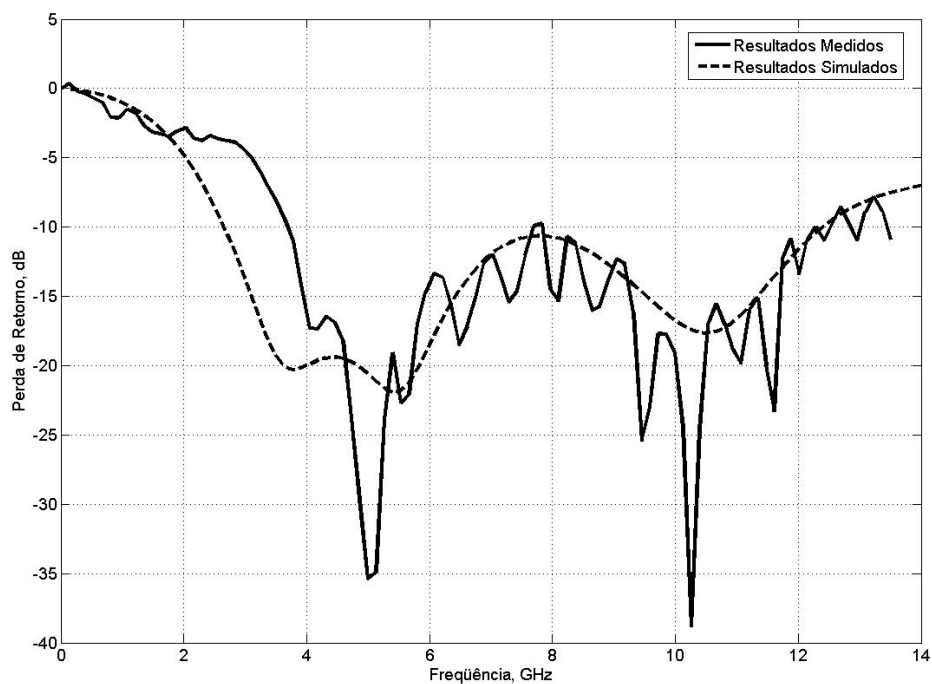


Fig.4.5. Comparativo entre os resultados simulado e medido da perda de retorno para o monopolo com *patch* retangular (nível 0).

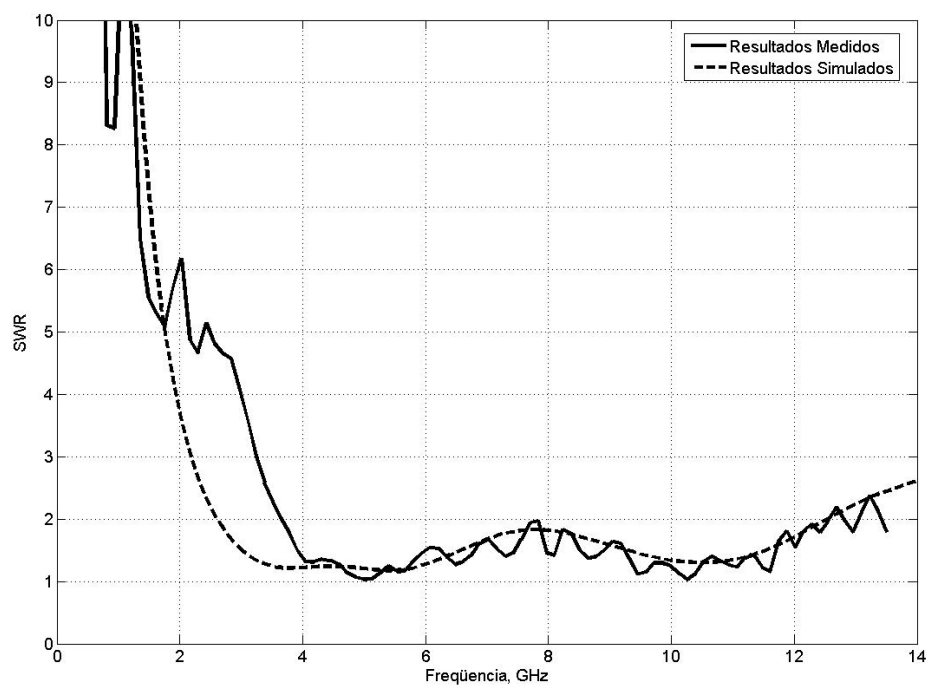


Fig.4.6. Comparativo entre os resultados simulado e medido do SWR para o monopolo com *patch* retangular (nível 0).

Na Fig.4.7, o resultado simulado da perda de retorno mostra que o monopolo de *patch* quase-fractal de nível 1 apresenta uma largura de banda de 2,8 GHz na faixa de 2,3 a 5,1 GHz, enquanto que, para o resultado medido, a largura de banda é de 1,55 GHz na faixa de 3,75 a 5,3 GHz. Para este monopolo, observa-se uma boa restrição na largura de banda. O resultado medido da perda de retorno apresenta um pico de -31 dB. Na Fig.4.8, tem-se o resultado comparativo simulado e medido do SWR, cujo resultado medido apresenta um valor máximo em torno de 5.

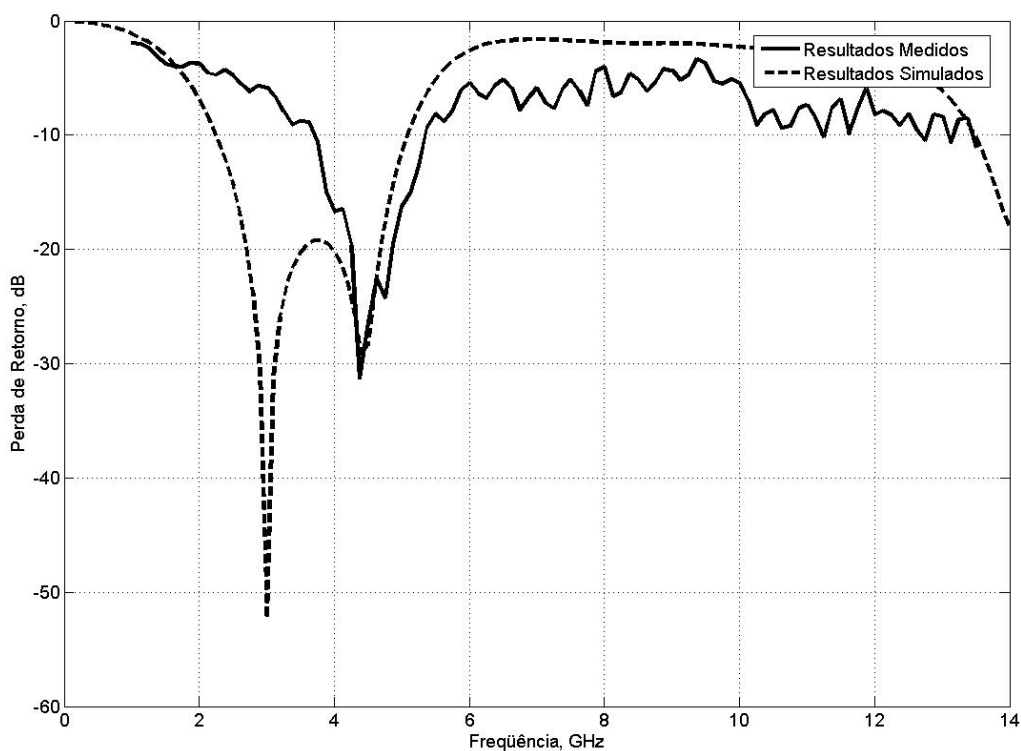


Fig.4.7. Comparativo entre os resultados simulado e medido da perda de retorno para o monopolo quase-fractal de nível 1.

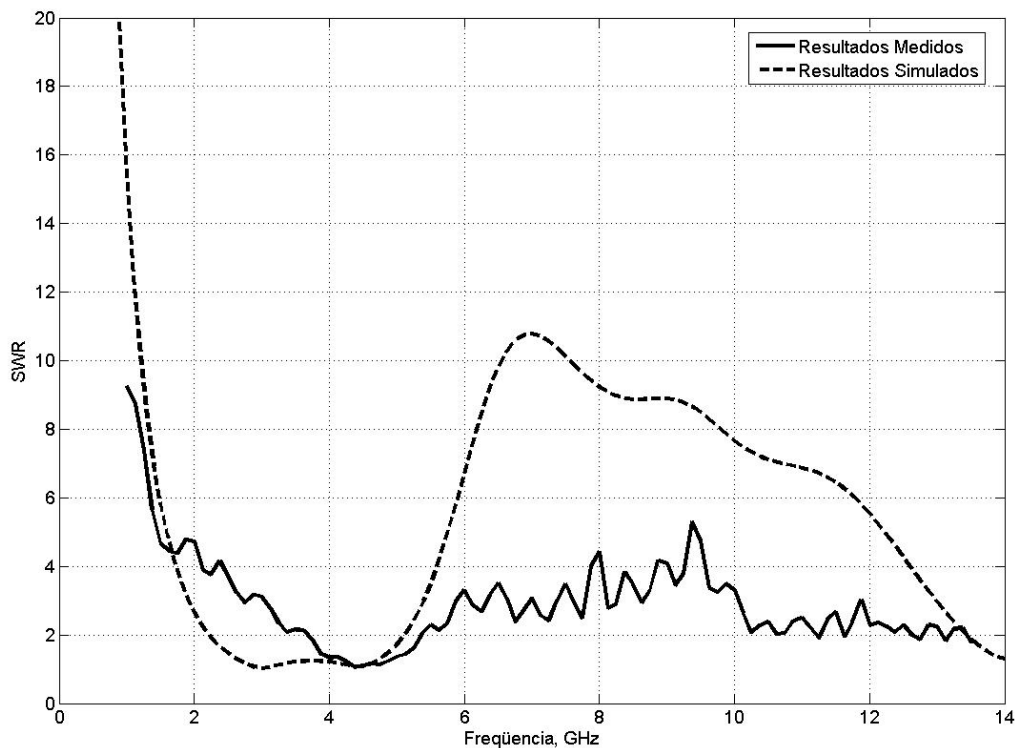


Fig.4.8. Comparativo entre os resultados simulado e medido do SWR para o monopolo quase-fractal de nível 1.

Na Fig.4.9, o resultado simulado da perda de retorno mostra um comportamento multibanda para o monopolo de *patch* quase-fractal de nível 2, apresentando duas ressonâncias. A primeira ressonância possui uma largura de banda de 2,4 GHz na faixa de 2,2 a 4,6 GHz, e a segunda, uma largura de banda de 600 MHz na faixa de 12,55 a 13,15 GHz. Para o resultado medido, a largura de banda é de 400 MHz na faixa de 4,05 a 4,45 GHz para a primeira ressonância, enquanto que, para a segunda, se apresenta maior que 700 MHz. Já na Fig.4.10, pode-se observar os resultados simulado e medido do SWR, cujo valor máximo medido é de aproximadamente 5,8 na faixa considerada.

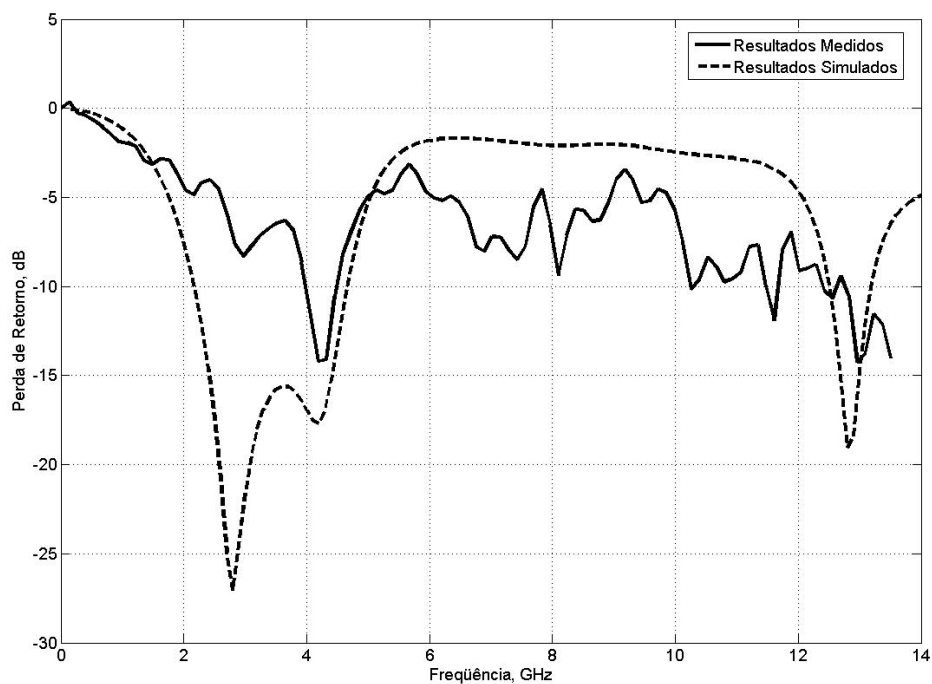


Fig.4.9. Comparativo entre os resultados simulado e medido da perda de retorno para o monopolo quase-fractal de nível 2.

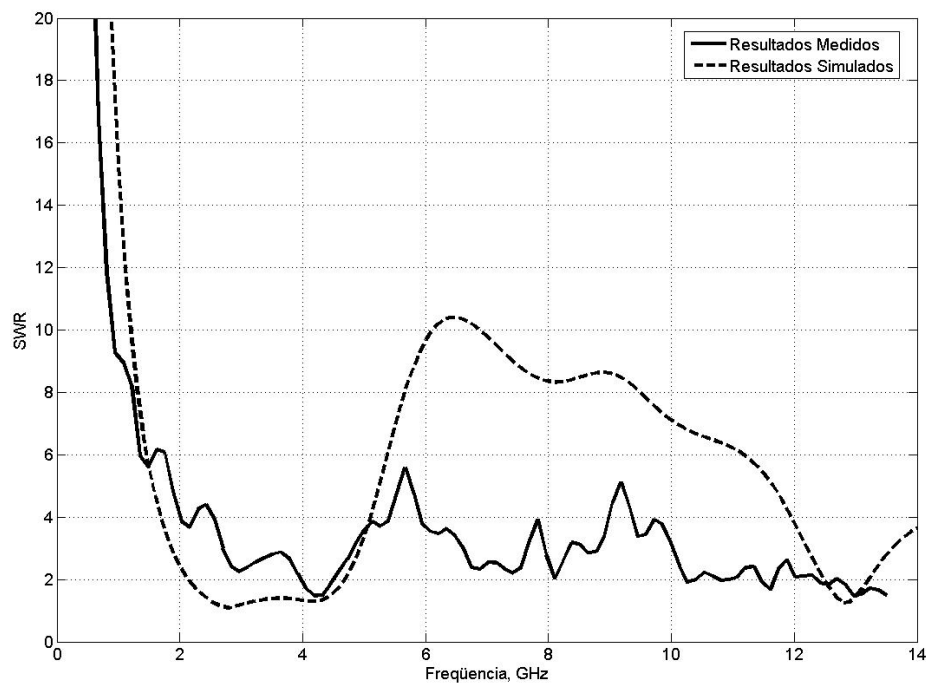
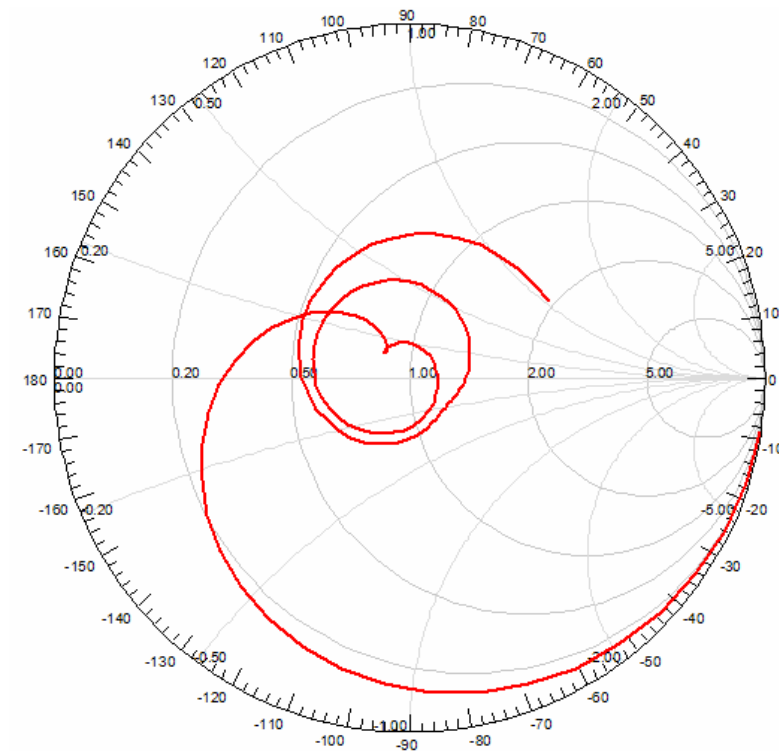


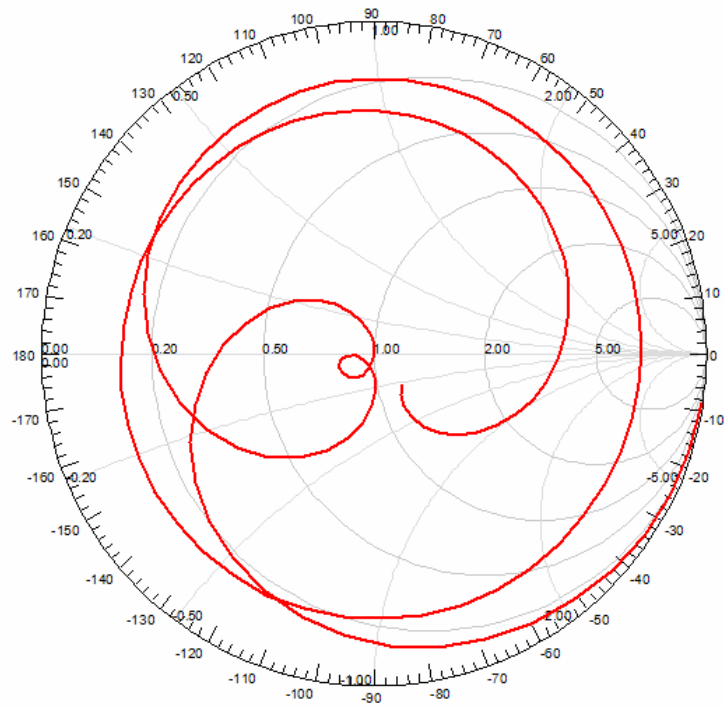
Fig.4.10. Comparativo entre os resultados simulado e medido do SWR para o monopolo quase-fractal de nível 2.

Foram simuladas no *Ansoft HFSS*, as Carta de *Smith* e aos diagramas de radiação dos monopolos quase-fractais apresentando variação nos níveis do fractal, para fins de comparação entre o comportamento das estruturas.

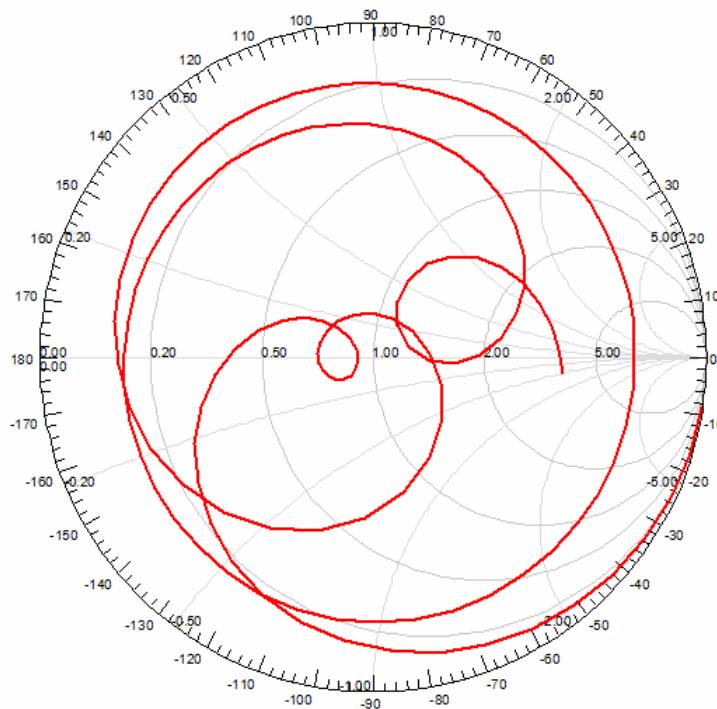
A Fig.4.11 abaixo, mostra o comportamento das antenas construídas para a Carta de *Smith*, podendo ser comparada a resposta de cada gráfico nas diferentes variações dos níveis do fractal. Os gráficos foram gerados na faixa de 100 MHz a 14 GHz.



(a)



(b)



(c)

Fig.4.11. Gráficos da Carta de *Smith* para os monopolos quase-fractais, apresentando diferentes níveis. As imagens destacam: (a) resultado para o monopolo de nível 0, (b) resultado para o monopolo de nível 1 e (c) resultado para o monopolo de nível 2.

Nas Figs. 4.12, 4.13 e 4.14, pode-se observar os resultados obtidos através dos diagramas de radiação 2D para as três configurações de monopolos, a medida que se aumenta o nível do fractal. Os diagramas foram gerados na frequência de 3 GHz, para os planos: vertical xz (elevação, com θ variando e $\phi = 0^\circ$) e horizontal xy (azimutal, com ϕ variando e $\theta = 90^\circ$). A Fig. 4.15 ilustra os diagramas de radiação tridimensionais para os monopolos de nível 0, 1 e 2.

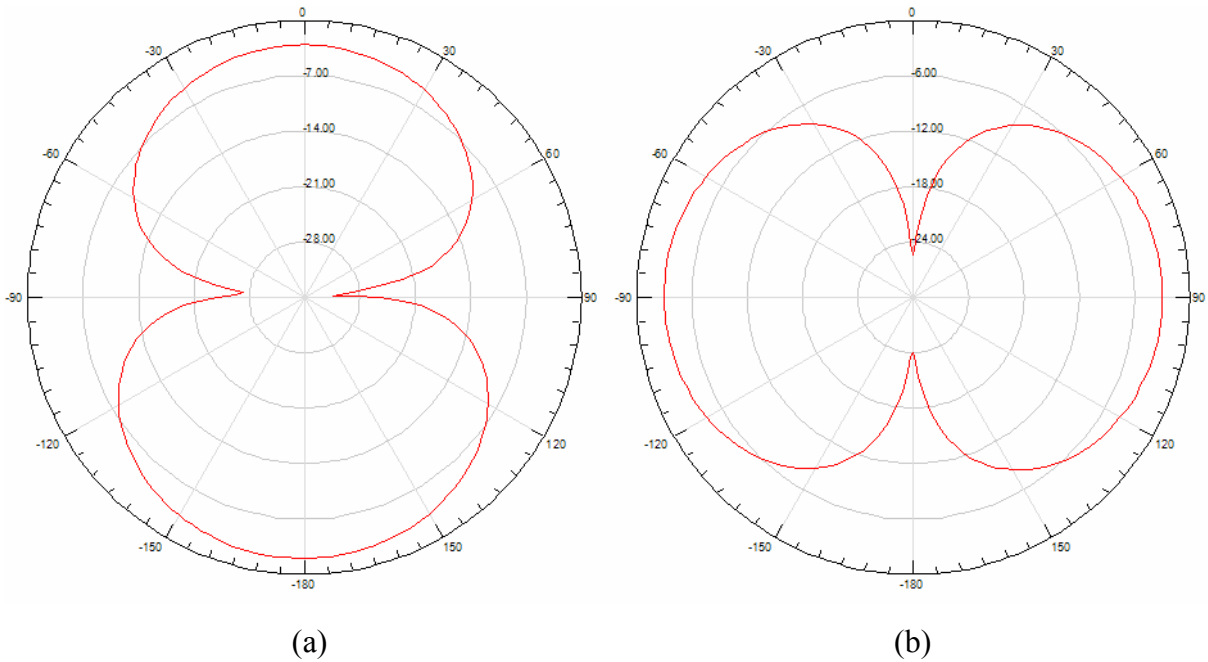


Fig.4.12. Gráficos do diagrama de radiação 2D para o monopolo de *patch* retangular, nível 0. As imagens destacam: (a) elevação ($\theta, \phi = 0^\circ$), (b) azimutal ($\phi, \theta = 90^\circ$).

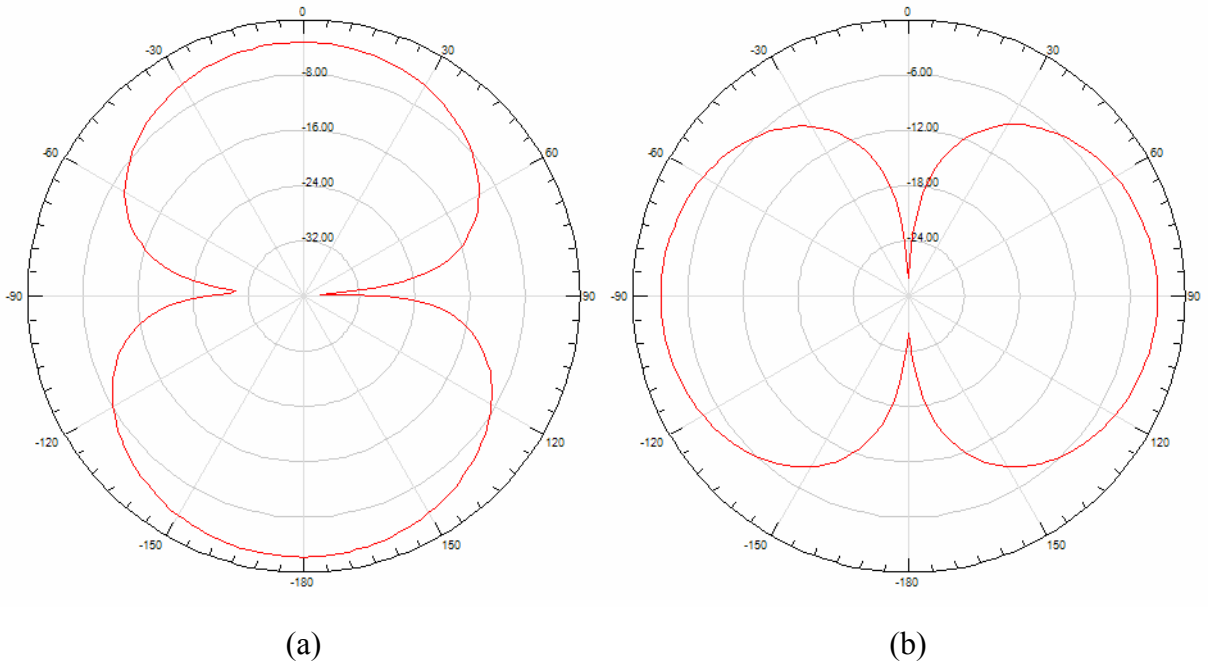


Fig.4.13. Gráficos do diagrama de radiação 2D para o monopolo quase-fractal de nível 1.
As imagens destacam: (a) elevação ($\theta, \phi = 0^\circ$), (b) azimutal ($\phi, \theta = 90^\circ$).

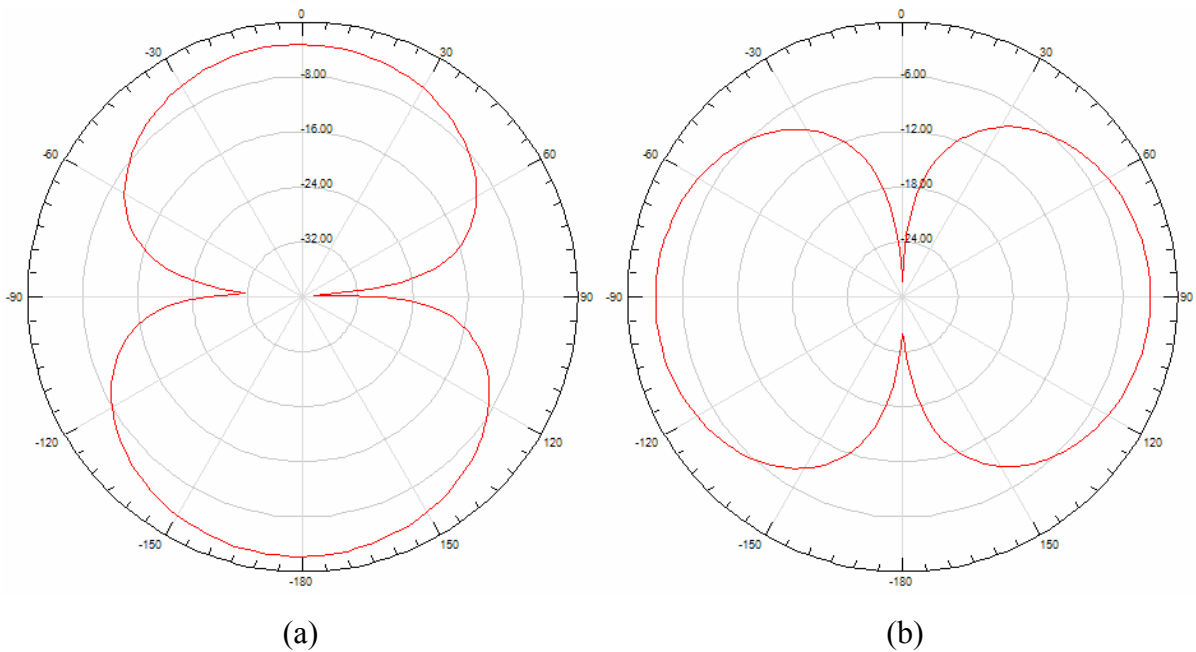


Fig.4.14. Gráficos do diagrama de radiação 2D para o monopolo quase-fractal de nível 2.
As imagens destacam: (a) elevação ($\theta, \phi = 0^\circ$), (b) azimutal ($\phi, \theta = 90^\circ$).

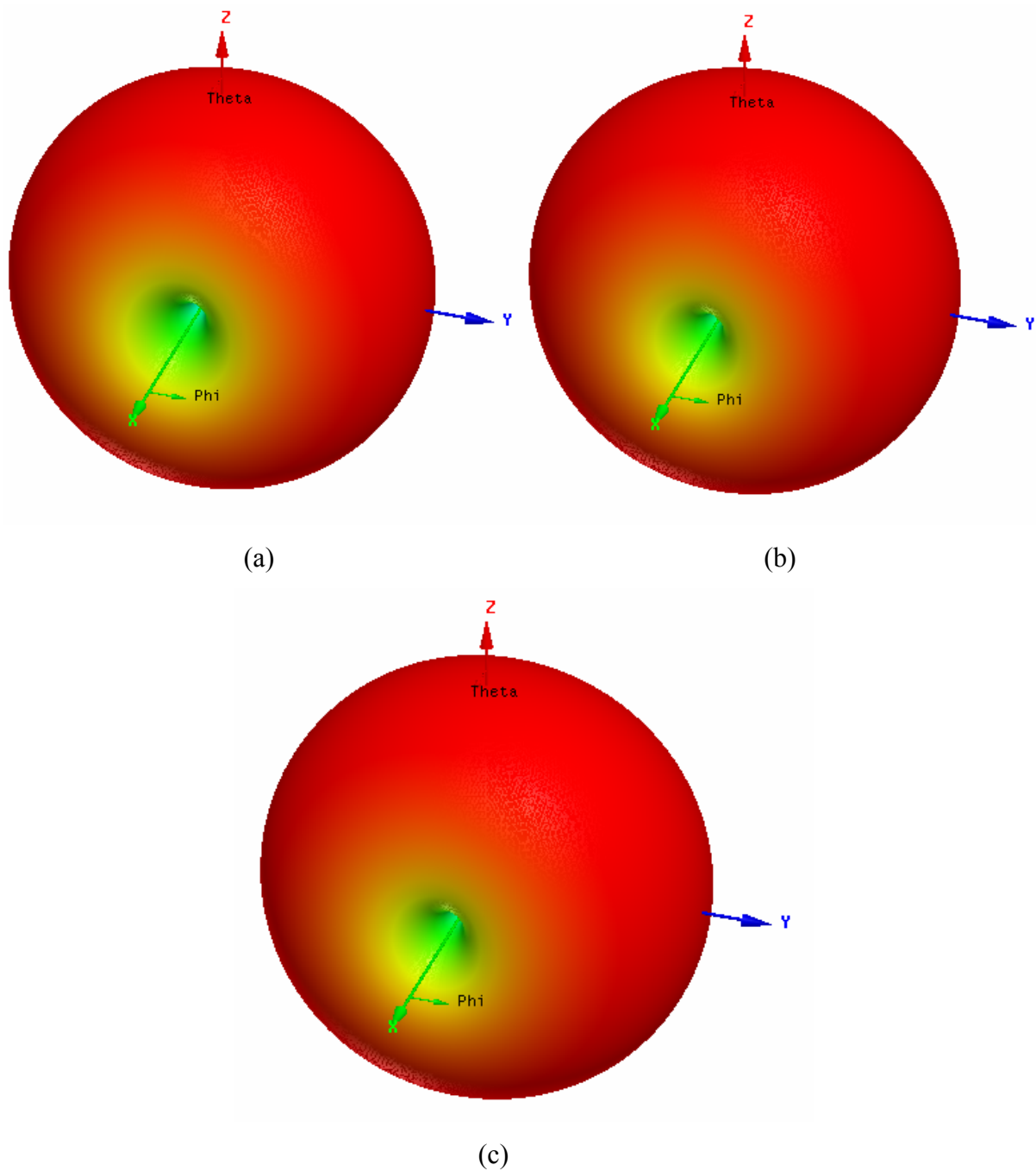


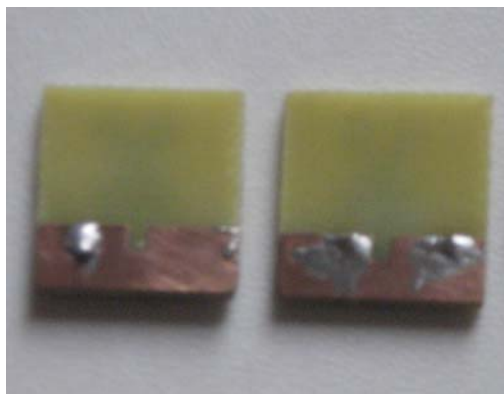
Fig. 4.15. Gráficos do diagrama de radiação 3D para os monopolos quase-fractais, apresentando diferentes níveis. As imagens destacam: (a) resultado para o monopolo de nível 0, (b) resultado para o monopolo de nível 1 e (c) resultado para o monopolo de nível 2.

4.3.2 Miniaturização dos Monopolos Quase-fractais

A Fig.4.16 corresponde às imagens das estruturas construídas após a corrosão, miniaturizadas em 50% com o objetivo de deslocar a faixa de frequência. Observa-se as estruturas com diferentes níveis para o fractal de Koch, apresentando plano de terra truncado (monopolo) com a inserção do recorte retangular.



(a)



(b)

Fig.4.16. Monopolos de microfita com *patches* quase-fractais de Koch e diferentes níveis, miniaturizados em 50%. As fotos destacam: (a) os *patches* condutores correspondentes aos monopolos de níveis 1 e 2, respectivamente, da esquerda para a direita; (b) os planos de terra.

A Fig.4.17 apresenta o resultado simulado e medido da perda de retorno para o monopolo de *patch* quase-fractal de nível 1 com miniaturização em 50%. O resultado simulado possui uma largura de banda de 1,8 GHz na faixa de 6,9 a 8,7 GHz. O resultado medido possui uma largura de banda de 1 GHz na faixa de 8,5 a 9,5 GHz. O resultado medido da perda de retorno apresenta um pico em -18 dB. Na Fig.4.18, observa-se que o resultado medido do SWR apresenta um valor máximo em 5.

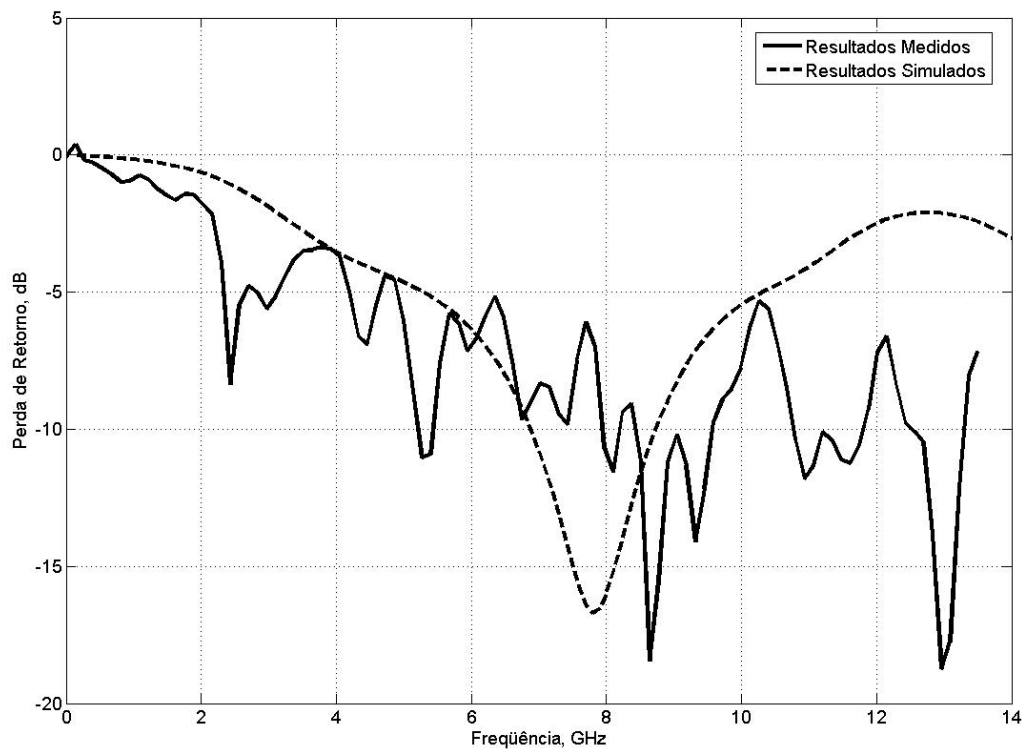


Fig.4.17. Comparativo entre os resultados simulado e medido da perda de retorno para o monopolo quase-fractal de nível 1, com miniaturização de 50%.

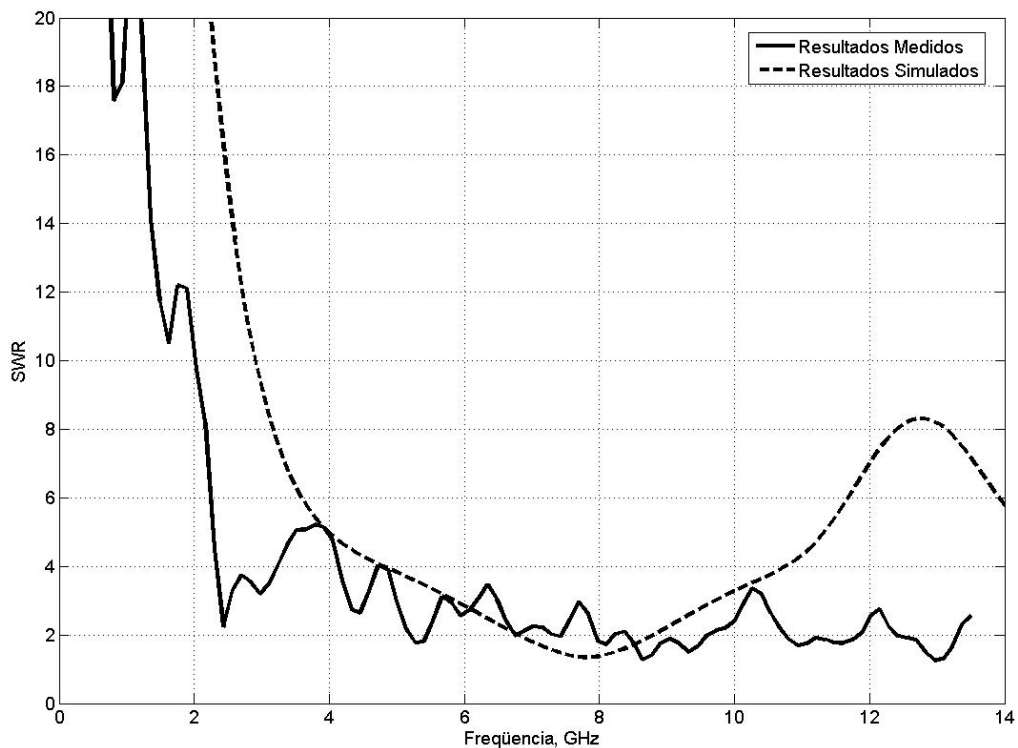


Fig.4.18. Comparativo entre os resultados simulado e medido do SWR para o monopolo quase-fractal de nível 1, com miniaturização de 50%.

Na Fig.4.19, o resultado simulado da perda de retorno para o monopolo de *patch* quase-fractal de nível 2 com miniaturização em 50% apresenta uma largura de banda de 1,3 GHz na faixa de 6,5 a 7,8 GHz. Para o resultado medido, a largura de banda é de 1 GHz na faixa de 7,9 a 8,9 GHz. O resultado medido da perda de retorno apresenta um pico de -24,7 dB. Na Fig.4.20, observa-se que os resultado medido do SWR apresenta um valor máximo em 4,5.

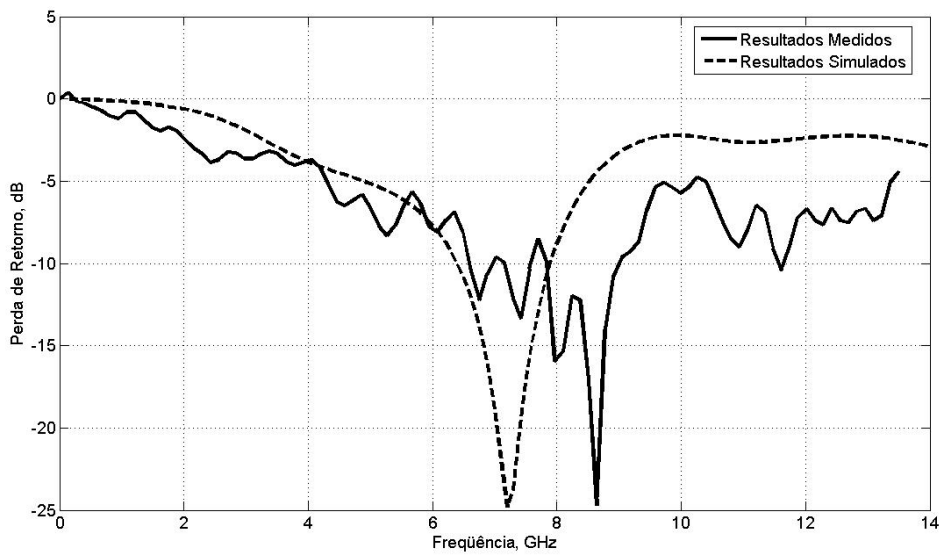


Fig.4.19 Comparativo entre os resultados simulado e medido da perda de retorno para o monopolo quase-fractal de nível 2, com miniaturização de 50%.

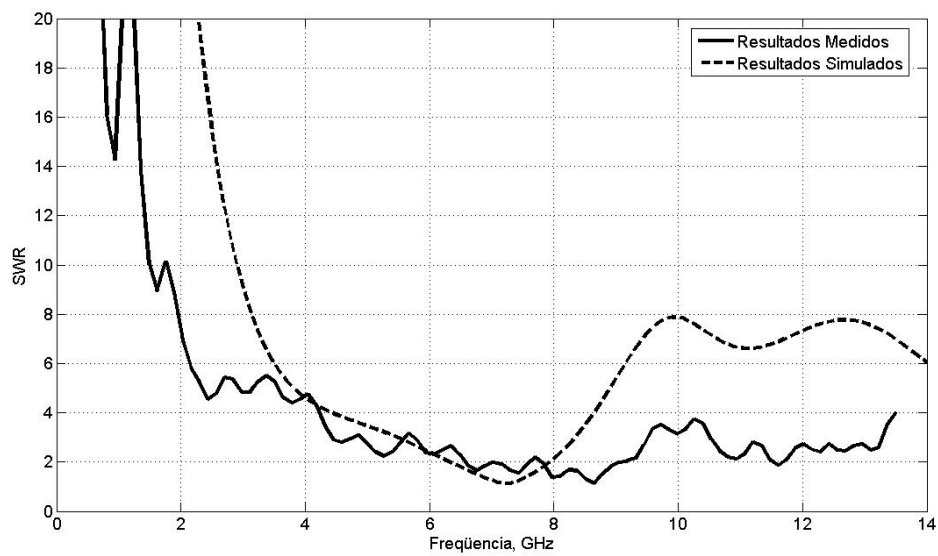


Fig.4.20. Comparativo entre os resultados simulado e medido do SWR para o monopolo quase-fractal de nível 2, com miniaturização de 50%.

4.4 Síntese do Capítulo

Neste capítulo foram discutidos o projeto, a construção e os resultados simulados e medidos da perda de retorno e do SWR para os monopolos de microfita com *patches* quase-fractais de Koch, apresentando diferentes níveis (0, 1 e 2). Também foram analisados a Carta de *Smith* e os diagramas de radiação 2D e 3D nas estruturas trabalhadas. Também pôde ser verificado o efeito ocasionado nas estruturas de nível 1 e 2, após a miniaturização das mesmas em 50%.

Capítulo 5

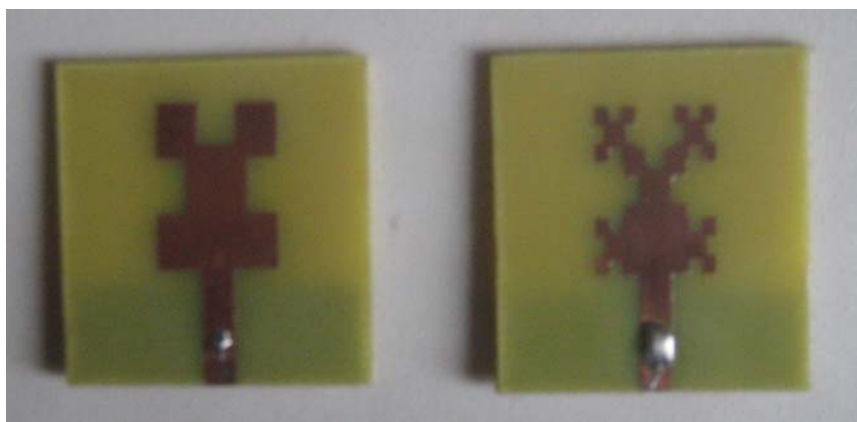
Resultados Parametrizados e Comparativos

5.1 Introdução

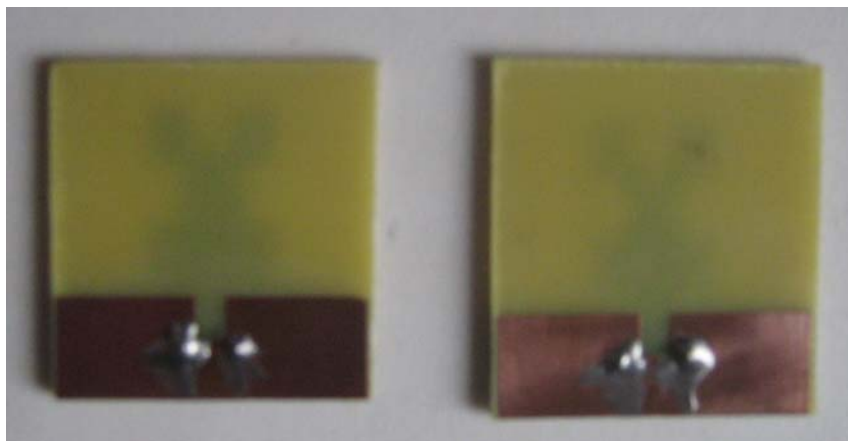
Algumas parametrizações foram realizadas para fins de comparação com os monopolos anteriormente trabalhados, tais como: a remoção do *inset* cujo comprimento equivale a Y_0 (ver Fig.4.2a); e a introdução do fractal de Koch nos contornos do recorte retangular do plano de terra em uma estrutura correspondente a cada nível fractal. Estas parametrizações são mostradas no decorrer do capítulo e ocorrem nos monopolos quase-fractais de níveis 1 e 2, possibilitando o controle da largura de banda, tanto quanto o deslocamento da banda em frequência.

5.2 Remoção do *Inset* nas Estruturas Fractais

A Fig.5.1 corresponde às imagens das estruturas construídas após a corrosão, parametrizadas de acordo com o Y_0 , que neste caso corresponde a 0, ou seja, o *inset* é inexistente. Pode-se observar as estruturas com diferentes níveis para o fractal de Koch, apresentando plano de terra truncado (monopolo) com a inserção do recorte retangular.



(a)



(b)

Fig.5.1. Monopolos de microfita com *patches* quase-fractais de Koch e diferentes níveis, com $Y_0 = 0$ mm. As fotos destacam: (a) os *patches* condutores correspondentes aos monopolos de níveis 1 e 2, respectivamente, da esquerda para a direita; (b) os planos de terra.

Na Fig.5.2, o resultado simulado da perda de retorno mostra que o monopolo de *patch* quase-fractal de nível 1, sem o *inset*, cujo comprimento é representado por Y_0 , apresenta um comportamento multibanda/banda larga. Na primeira ressonância, foi obtida uma largura de banda de 2,6 GHz na faixa de 2,6 a 5,2 GHz. Na segunda ressonância, foi obtida uma largura de banda de 4,3 GHz na faixa de 8,4 e 12,7 GHz. Para o resultado medido, a primeira ressonância apresenta uma largura de banda de 2 GHz na faixa de 3,4 a 5,4 GHz, e a segunda ressonância, uma largura de banda de 3,5 GHz na faixa de 9,2 a 12,7 GHz. Os valores medidos oscilam em torno de -13 dB na maior parte da faixa medida. Já na Fig.5.3, pode-se observar que os resultados simulado e medido apresentam uma boa concordância, com valores oscilando abaixo de 2 na maior parte da faixa de frequência considerada, porém com um valor máximo medido em 3,4.

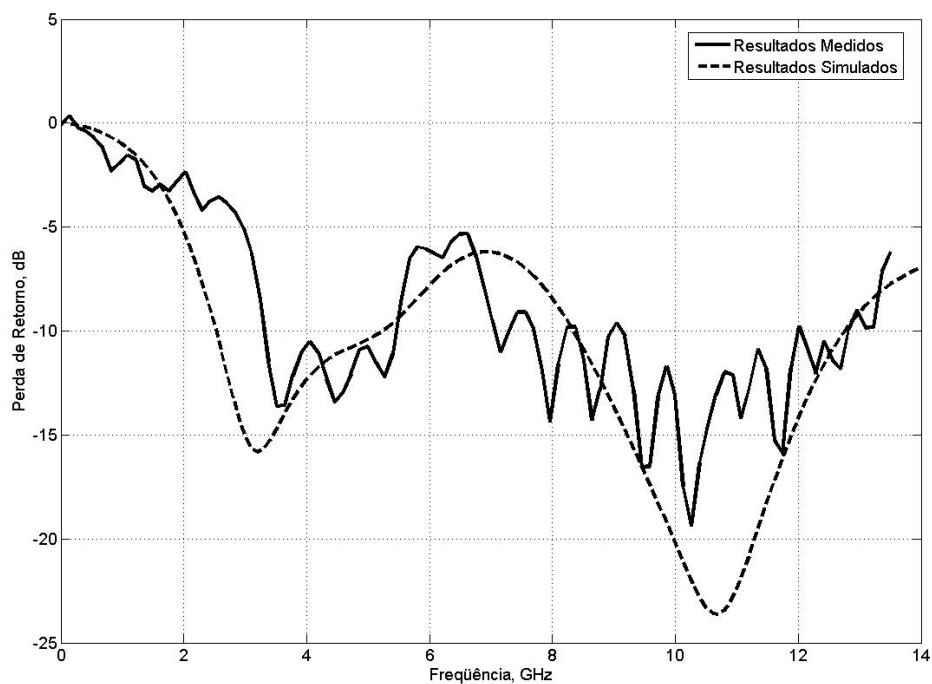


Fig.5.2. Comparativo entre os resultados simulado e medido da perda de retorno para o monopolo quase-fractal de nível 1, com $Y_0 = 0$ mm.

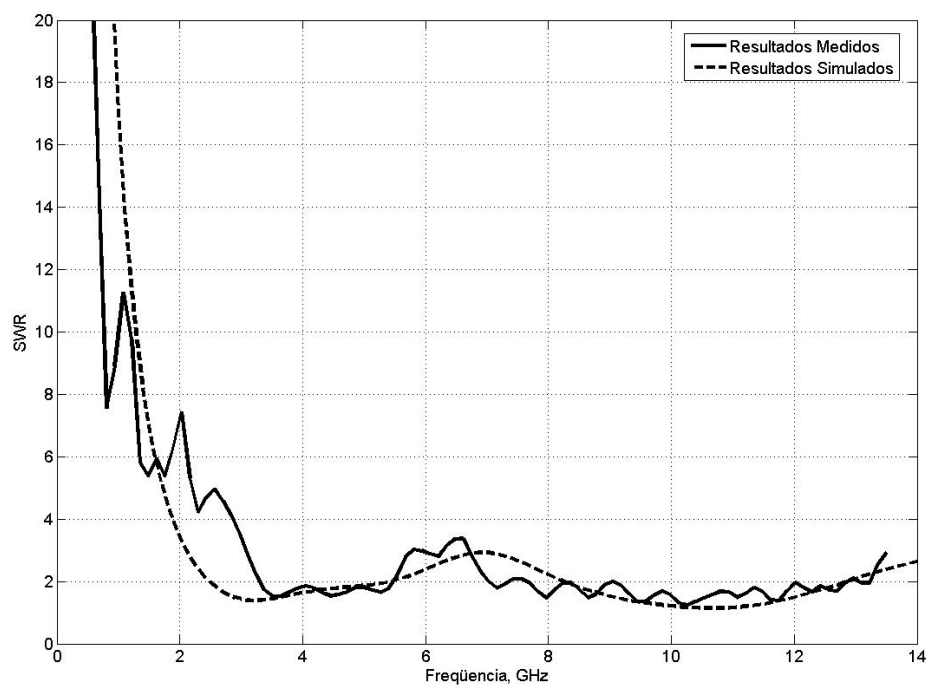


Fig.5.3. Comparativo entre os resultados simulado e medido do SWR para o monopolo quase-fractal de nível 1, com $Y_0 = 0$ mm.

A Fig.5.4 apresenta um resultado comparativo entre as duas estruturas de nível 1: o monopolo quase-fractal com $Y_0 = 4,125$ mm (mostrado no capítulo 4) e o monopolo parametrizado com a retirada do Y_0 . Através dessa parametrização, pode-se perceber que foi obtida a presença de uma segunda ressonância, sendo que a primeira ressonância para este caso, apresentou largura de banda superior à estrutura convencional, mas obteve uma menor perda de retorno.

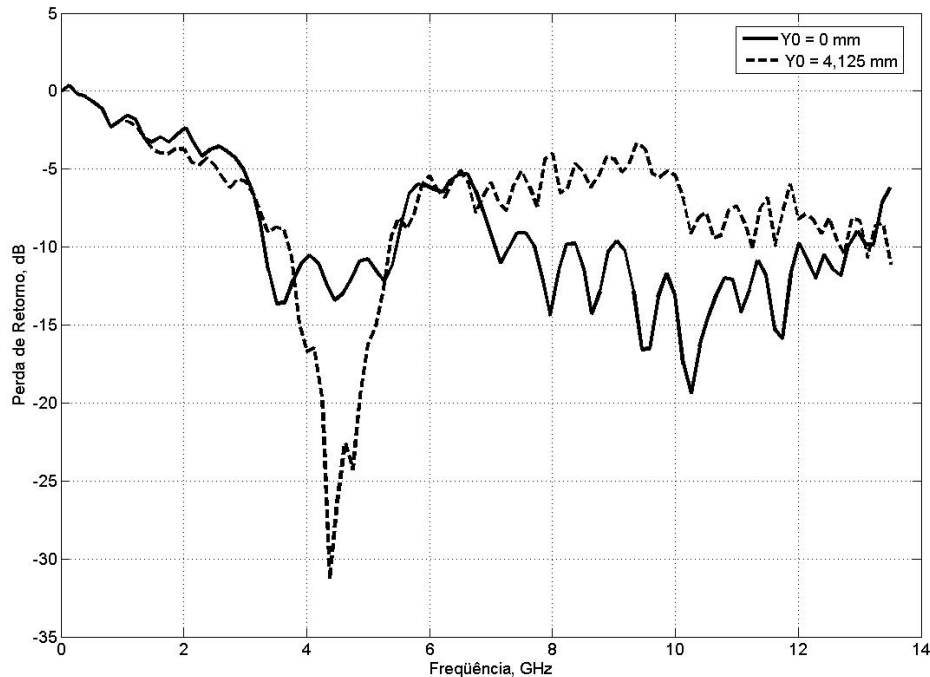


Fig.5.4. Comparativo entre os resultados medidos da perda de retorno para os monopolos quase-fractais de nível 1, com diferentes valores de Y_0 .

Na Fig.5.5, tem-se o resultado simulado da perda de retorno para o monopolo de *patch* quase-fractal de nível 2, sem o *inset* de comprimento Y_0 . Este resultado apresenta duas ressonâncias principais, sendo que a primeira mostra uma largura de banda de 1,2 GHz na faixa de 2,4 a 3,6 GHz, e a segunda, uma largura de 2,9 GHz na faixa de 8,5 e 11,4 GHz. No entanto, para o resultado medido, tem-se uma ressonância com uma largura de banda é de 3,3 GHz na faixa de 8,5 a 11,8 GHz. Os valores medidos oscilam em torno de -15 dB na maior parte da faixa medida. Na Fig.5.6, observa-se que os resultados simulado e medido apresentam uma boa concordância, com valores oscilando abaixo de 2 na maior parte da faixa de frequência considerada, porém com um valor máximo medido em 5 e aproximadamente em 3,3 na simulação.

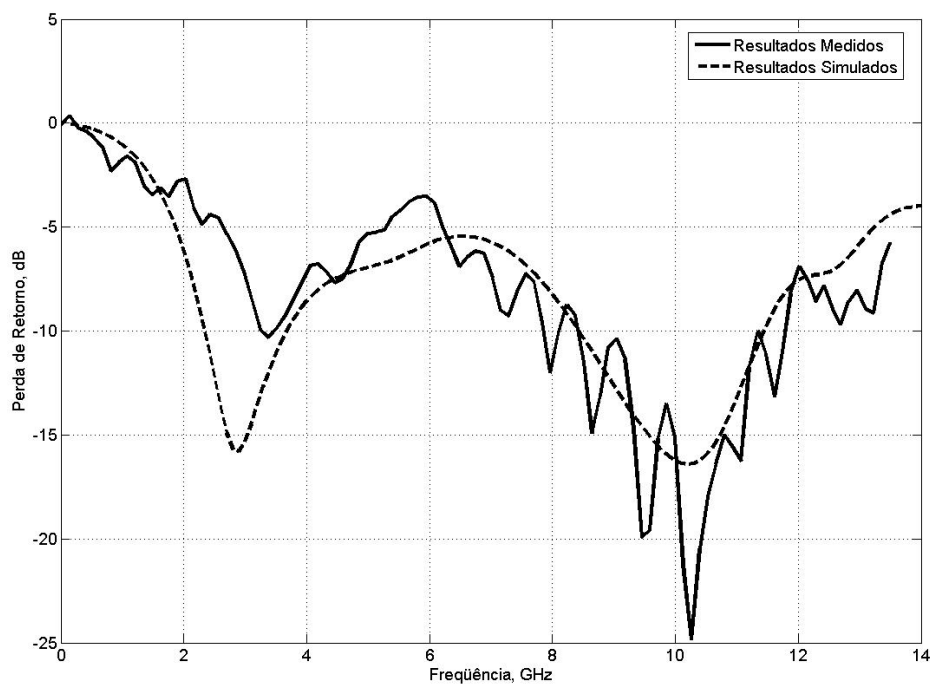


Fig.5.5. Comparativo entre os resultados simulado e medido da perda de retorno para o monopolo quase-fractal de nível 2, com $Y_0 = 0$ mm.

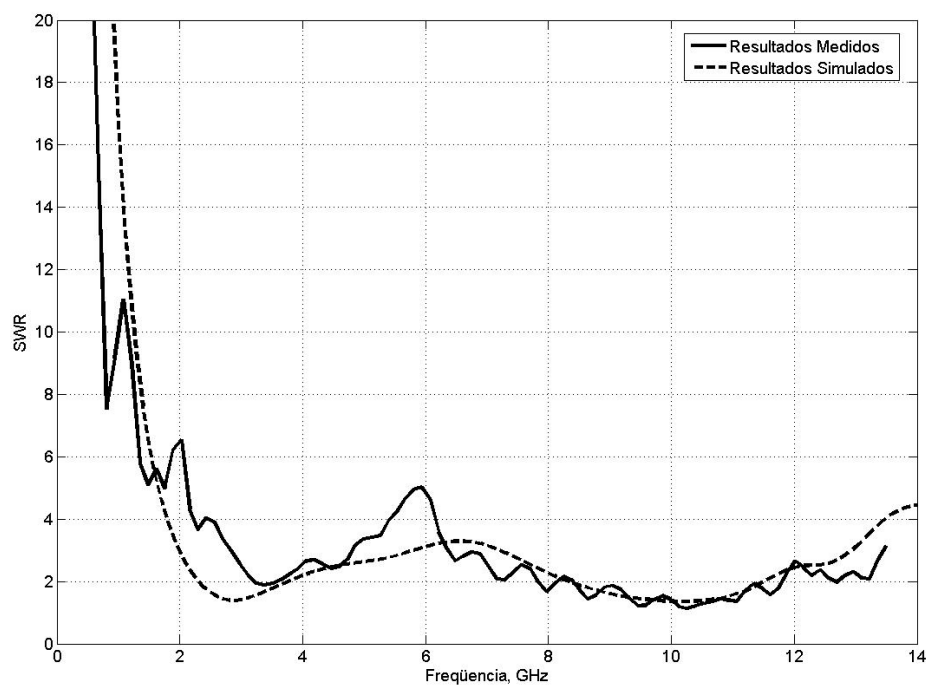


Fig.5.6. Comparativo entre os resultados simulado e medido do SWR para o monopolo quase-fractal de nível 2, com $Y_0 = 0$ mm.

A Fig.5.7 ilustra o resultado comparativo entre as duas estruturas de nível 2: o monopolo quase-fractal com $Y_0 = 4,125$ mm (mostrado no capítulo 4) e o monopolo parametrizado com a retirada do Y_0 . Pode-se perceber com esta parametrização, o surgimento de uma segunda ressonância com largura de banda maior que apresentada na estrutura anterior na faixa de frequência medida considerada.

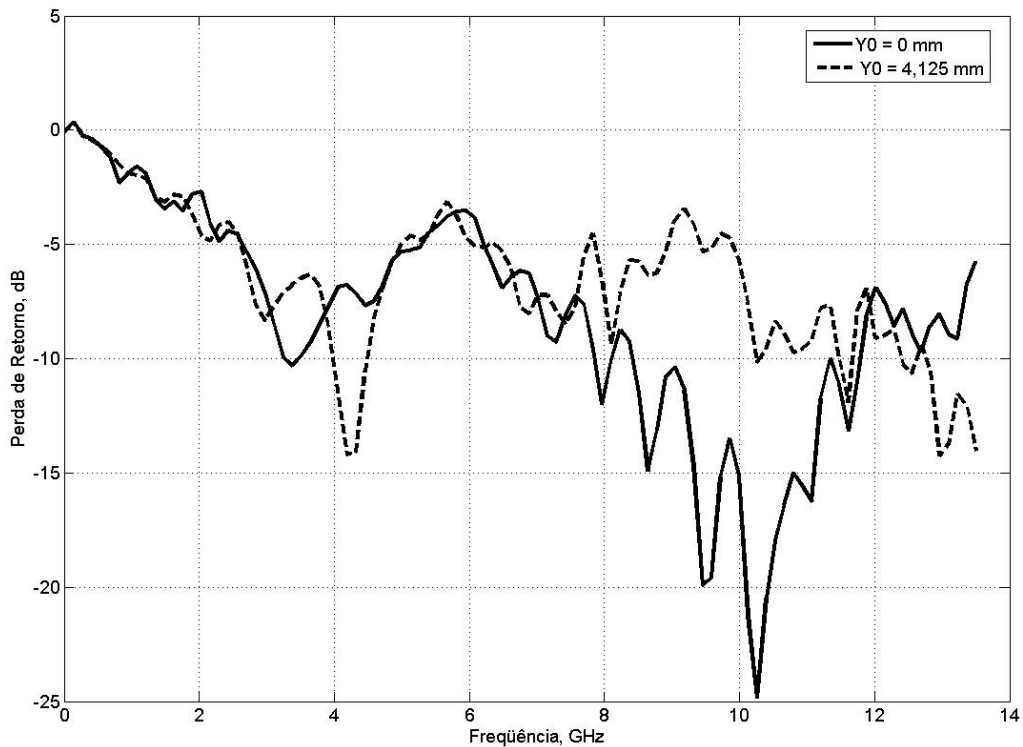
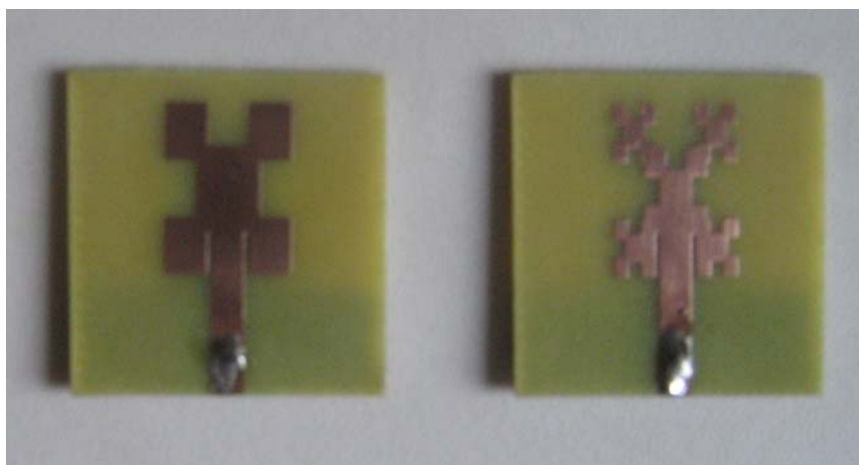


Fig.5.7. Comparativo entre os resultados medidos da perda de retorno para os monopolos quase-fractais de nível 2 com diferentes valores de Y_0 .

5.3 Inserção do Fractal de Koch no Recorte Retangular do Plano de Terra

A Fig.5.8 corresponde às imagens das estruturas construídas após a corrosão, parametrizadas de acordo a inserção do fractal de Koch nos contornos do recorte retangular do plano de terra. Podem ser observadas as estruturas com diferentes níveis para o fractal de Koch, apresentando plano de terra truncado.



(a)



(b)

Fig.5.8. Monopolos de microfita com *patches* quase-fractais de Koch e diferentes níveis, com a inserção do fractal de Koch nos contornos do recorte retangular do plano de terra. As fotos destacam: (a) os *patches* condutores correspondentes aos monopolos de níveis 1 e 2, respectivamente, da esquerda para a direita; (b) os planos de terra.

A Fig.5.9 mostra o resultado simulado da perda de retorno para o monopolo de *patch* quase-fractal de nível 1 com o fractal nos contornos da fenda do plano de terra. O resultado simulado apresenta uma largura de banda de 2,9 GHz na faixa de 2,3 a 5,2 GHz. Para o resultado medido, a largura de banda é de 2,4 GHz na faixa de 3,3 a 5,7 GHz. O resultado medido da perda de retorno apresenta um pico de -32 dB. Na Fig.5.10, observa-se que os resultados simulado e medido apresentam uma boa concordância, com um valor máximo medido em 5, e de aproximadamente 3,3 na simulação.

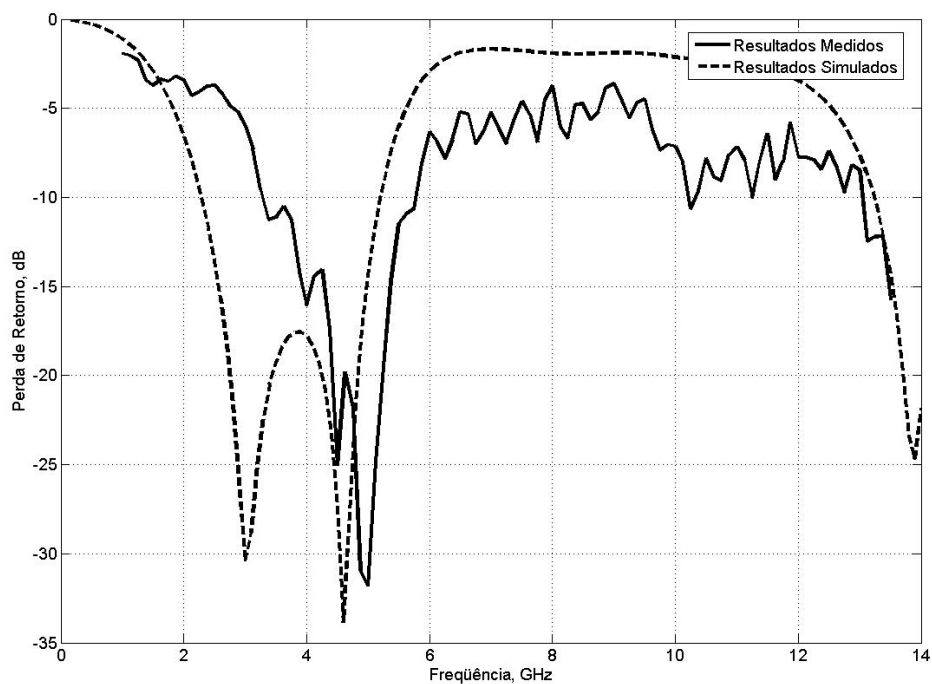


Fig.5.9. Comparativo entre os resultados simulado e medido da perda de retorno para o monopolo quase-fractal de nível 1, com fractal nos contornos da fenda do plano de terra.

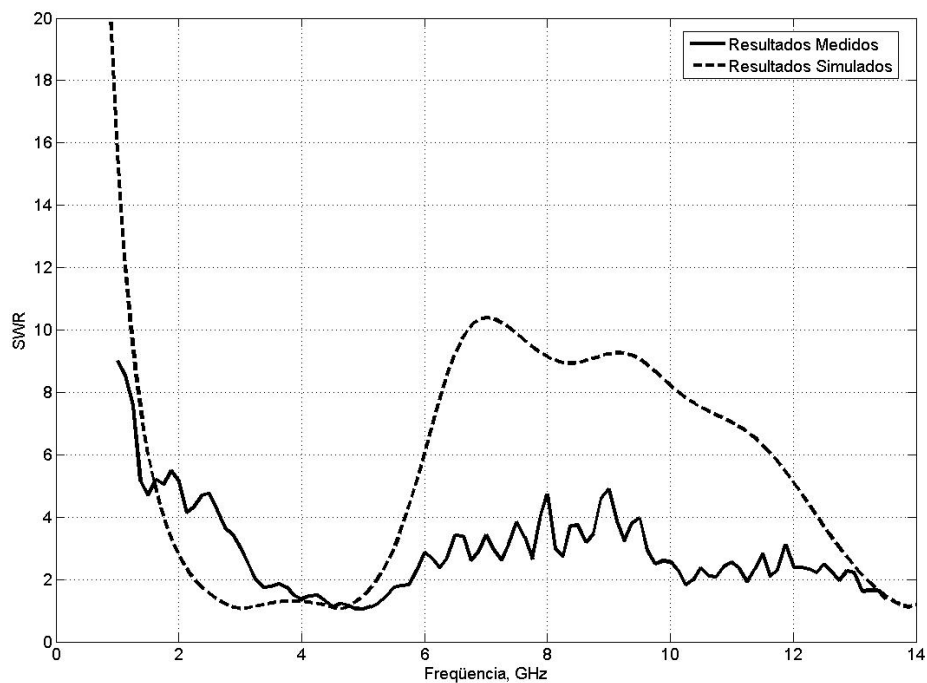


Fig.5.10. Comparativo entre os resultados simulado e medido do SWR para o monopolo quase-fractal de nível 1, com fractal nos contornos da fenda do plano de terra.

A Fig.5.11 apresenta um resultado comparativo entre as duas estruturas de nível 1: o monopolo quase-fractal (mostrado no capítulo 4) e o monopolo parametrizado com a inserção do fractal na fenda do plano de terra. Através dessa parametrização, pode-se perceber um aumento na largura de banda em relação à estrutura convencional.

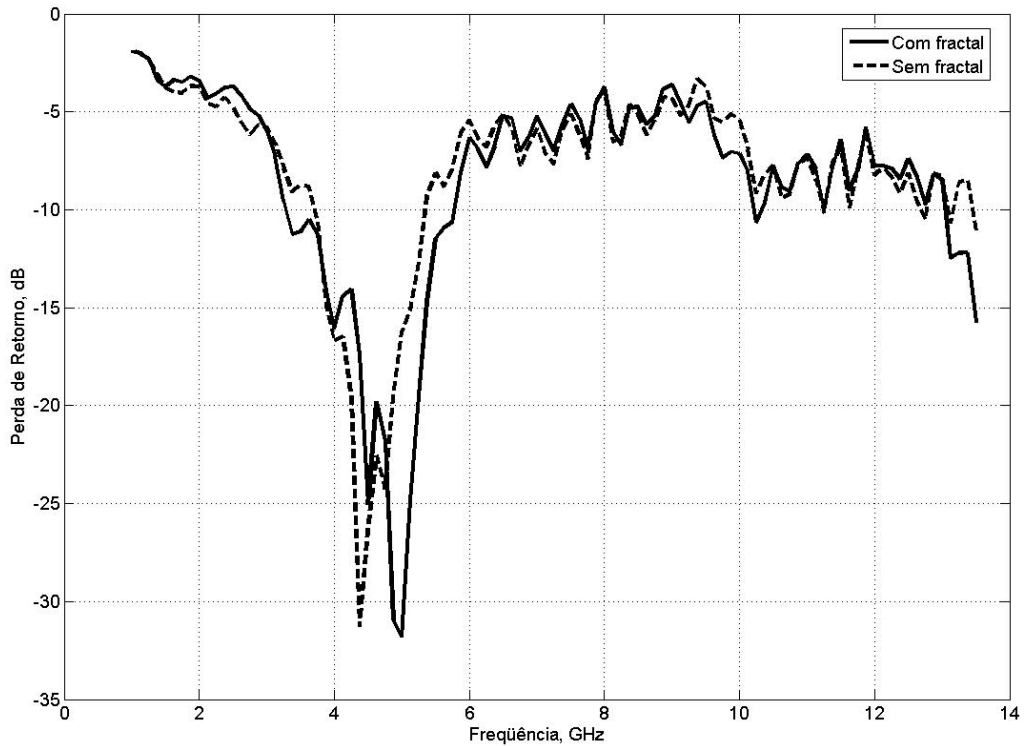


Fig.5.11. Comparativo entre os resultados medidos da perda de retorno para os monopolos quase-fractais de nível 1, com e sem fractal nos contornos da fenda do plano de terra.

Na Fig.5.12, o resultado medido não apresenta uma resposta satisfatória para a perda de retorno neste tipo de parametrização correspondente ao nível 2, porém, o resultado simulado apresentou uma boa resposta em frequência. Na Fig.5.13, observa-se que os resultados simulado e medido não apresentam boa concordância.

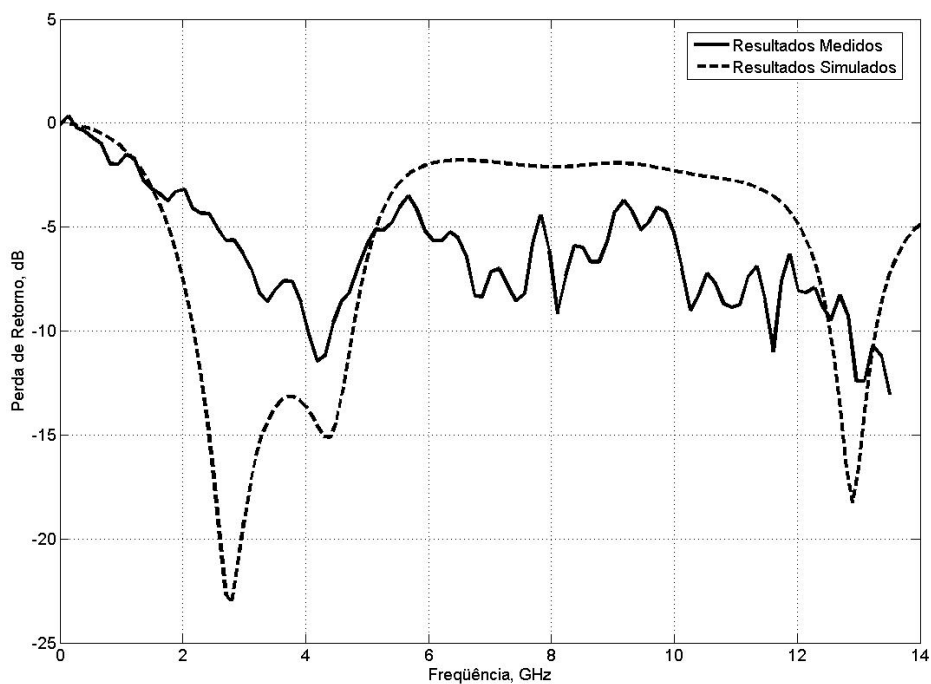


Fig.5.12. Comparativo entre os resultados simulado e medido da perda de retorno para o monopolo quase-fractal de nível 2, com fractal nos contornos da fenda do plano de terra.

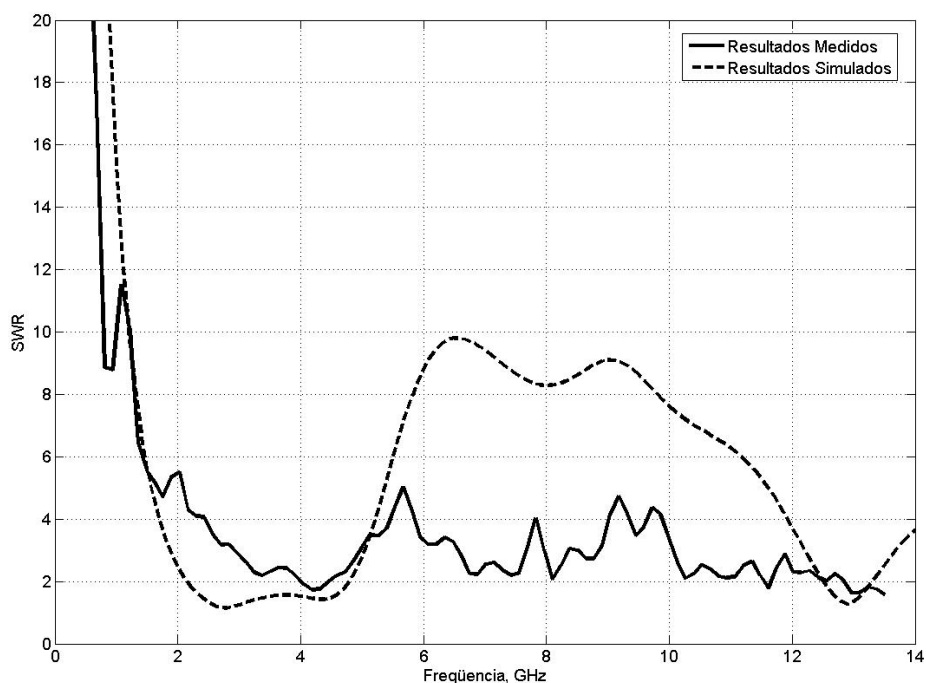


Fig.5.13. Comparativo entre os resultados simulado e medido do SWR para o monopolo quase-fractal de nível 2, com fractal nos contornos da fenda do plano de terra.

A Fig.5.14 ilustra o comparativo entre os monopolos quase-fractais sem a inserção do fractal na fenda e com a inserção do fractal na fenda. Desta forma, observa-se que para a estrutura sem o contorno fractal, se obteve uma melhor resposta em frequência, para o nível 2.

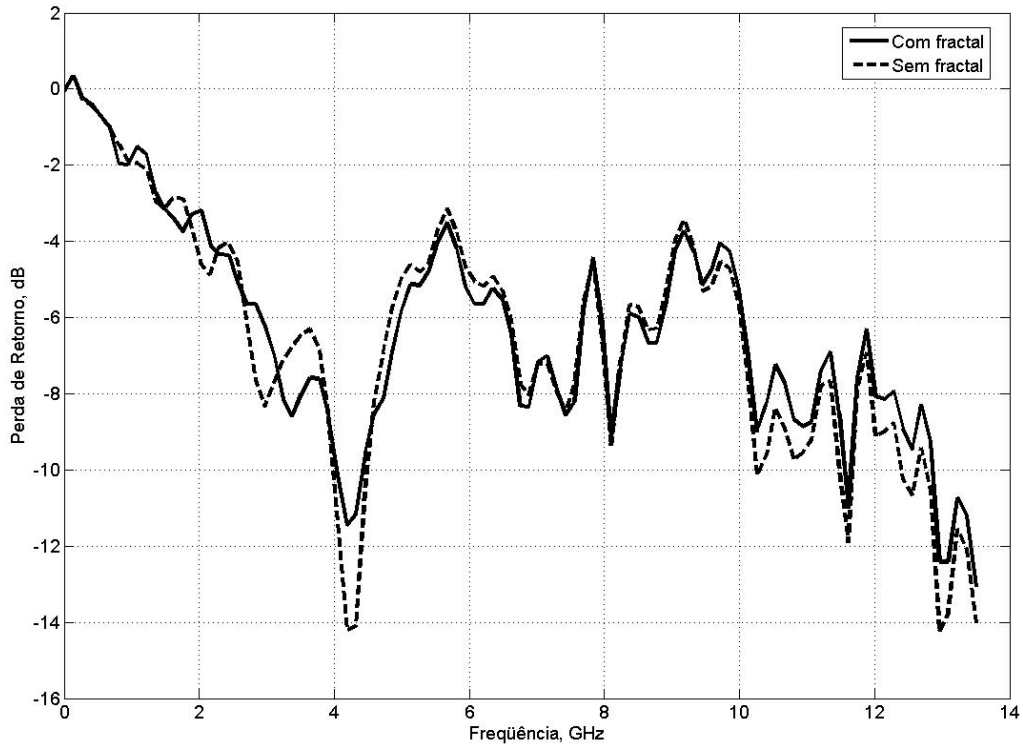


Fig.5.14. Comparativo entre os resultados medidos da perda de retorno para os monopolos quase-fractais de nível 2, com e sem fractal nos contornos da fenda do plano de terra.

5.4 Síntese do Capítulo

Neste capítulo, as antenas fractais foram parametrizadas de dois modos, através da remoção do *inset* nas estruturas fractais e da inserção do fractal de Koch nos contornos da fenda do plano de terra. No primeiro caso, foi verificada a variação do Y_0 de 4,125 mm para 0 mm, com o intuito de se analisar o comportamento das estruturas em relação à largura de banda. No segundo caso, foi verificada a comparação das estruturas sem e com o fractal inserido no plano de terra, com o intuito de analisar o aumento da perda de retorno, bem como o aumento da largura de banda.

Capítulo 6

Conclusões

Neste trabalho foram investigadas as características de monopolos de *patch* de microfita com contornos fractais de Koch. As antenas de Koch investigadas foram construídas a partir de uma antena monopolo com *patch* retangular, cuja alimentação ocorre por meio de linha de microfita. Esta antena de referência trabalha na faixa UWB (3,1 a 10,6 GHz). A finalidade da aplicação dos contornos fractais no *patch* retangular, foi de possibilitar uma redução considerável na largura de banda. Desta forma, construíram-se três níveis de fractais (0, 1 e 2), para se investigar o efeito produzido na largura de banda das antenas planares. Foi comprovado que para as antenas quase-fractais projetadas, a que apresentou o melhor comportamento foi a de nível 1.

Foi realizada também uma miniaturização em 50% nos monopolos fractais para os níveis 1 e 2, proporcionando o deslocamento em frequência. Em ambos os níveis, foram obtidos bons resultados. Posteriormente, foram realizadas duas parametrizações com o intuito de se analisar o comportamento da largura de banda em relação aos monopolos quase-fractais também nos níveis 1 e 2. A primeira parametrização ocorreu com a remoção do *inset* de comprimento Y_0 nas estruturas fractais de Koch, onde foi observado graficamente o surgimento de uma segunda faixa de frequência, tornando a estrutura multibanda/banda larga. Para este caso, conclui-se que a antena quase-fractal de nível 1 apresentou o melhor comportamento em relação ao resultado simulado/medido. Outra parametrização foi a utilização do fractal de Koch nos contornos da fenda do plano de terra a fim de se obter uma maior perda de retorno e possibilitar um melhor casamento de impedância. Pôde ser concluído que o monopolo quase-fractal de nível 1, para esta alteração, também apresentou uma melhor resposta.

Como propostas para trabalhos futuros podem ser citadas: projetar monopolos com a utilização de outros *patches* fractais, sendo possível analisar o comportamento em frequência obtido; variar os fatores de redução dos fractais de Koch, bem como a utilizar outras formas (triângulos, círculos) nos contornos do *patch*.

Referências

- [1] B. Mirzapour e A. A. L. Neyestanak, “Enhanced Wideband and Compact Size Fractal Koch Antenna”, *Microwave Opt. Technol Lett*, vol. 49, pp. 1077-1080, Maio 2007.
- [2] T. Tiehong e Z. Zheng, “A Novel Multiband Antenna: Fractal Antenna”, *Proceedings of ICCT*, pp. 1907-1910, 2003.
- [3] H. Rmili, O. El Mrabet, J.-M. Floc’h e J.-L Miane, “Study of an Electrochemically-Deposited 3-D Random Fractal Tree-Monopole Antenna”, *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, vol. 55, pp. 1045-1050, Abril 2007.
- [4] P. H. F. Silva, M. R. Silva, T. C. Silva, “Uma Contribuição ao Estudo de Filtros e Antenas de Microondas usando os Fractais de Sierpinski”, *Congresso de Pesquisa e Inovação da Rede Norte Nordeste de Educação Tecnológica*, 2007 .
- [5] X. L. Bao e M. J. Ammann, “Investigation on UWB Printed Monopole Antenna with Rectangular Slitted Groundplane”, *Microwave Opt. Technol Lett*, vol. 49, pp. 1585-1587, Julho 2007.
- [6] B. B. Mandelbrot, *Fractals: Form, Chance and Dimension*, NewYork, W H Freeman and Co, 1977.
- [7] C. P. Serra e E. W. Karas, *Fractais Gerados por Sistemas Dinâmicos Complexos*, Editora Universitária Champagnat, Curitiba, 1997.
- [8] J. I. A. Trindade, “Projeto de Antenas Planares em Linhas de Microfita utilizando Fractais de Minkowski”, Trabalho de Conclusão de Curso, Centro Federal de Educação Tecnológica da Paraíba, 2008.

- [9] C. P. Serra, E. W. Karas e R. Biloti, “Fractais: Propriedades e Construção”, Departamento de Matemática, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.
- [10] B. B. Mandelbrot, *The Fractal Geometry of Nature*, NewYork, W H Freeman and Co, 1982.
- [11] A. Batanete, A. Castro, H. Lago, “Natureza - Caos ou Ordem?”, Fundamentos e Ensino da Álgebra, Departamento de Matemática, Universidade de Coimbra, Faculdade de Ciências e Tecnologia, 2005.
- [12] M. R. Silva, “Projeto de Antenas de Microondas usando Fractais de Koch e Sierpinski”, Trabalho de Conclusão de Curso, Centro Federal de Educação Tecnológica da Paraíba, 2007.
- [13] T. C. Silva, “Projeto de Filtros em Linhas de Microfita com Fractais de Sierpinski”, Trabalho de Conclusão de Curso, Centro Federal de Educação Tecnológica da Paraíba, 2007.
- [14] G. Kumar e K. P. Ray, *Broadband Microstrip Antennas*, Artech House Publishers, 2003.
- [15] K.-L. Wong, *Compact and Broadband Microstrip Antennas*, Wiley Interscience, 2002.
- [16] C. A. Balanis, *Antenna Theory: Analysis and Design*, 3ª. Ed., Wiley Interscience, 2005.
- [17] C. L. Nóbrega, “Otimização dos Parâmetros de Monopulos Planares de Microfita para Aplicações em Sistemas de Banda Ultra Larga”, Tese de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Outubro 2008.
- [18] P. L. da Silva, “Modelagem de Superfícies Seletivas de Frequência e Antenas de Microfita utilizando Redes Neurais Artificiais”, Tese de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Junho 2006.
- [19] J.-F. Zürcher e F. E. Gardiol, *Broadband Patch Antennas*, Artech House Publishers, 1995.

- [20] C. F. L. de Vasconcelos, “Antenas de Microfita com *Patch* em Anel e Múltiplas Camadas Dielétricas Anisotrópicas Uniaxiais”, Tese de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Fevereiro 2006.
- [21] G. M. Feitoza, “Análise de Antenas de Microfita com *Patches* Circulares sobre Substratos Anisotrópicos usando o Método dos Potenciais de Hertz”, Tese de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Março 2005.
- [22] M. R. Silva, C. L. Nóbrega, A. M. Zenaide, P. H. F. da Silva, e A. G. D’Assunção, “Uma Nova Configuração de Monopolo Elíptico de Microfita de Banda Ultra Larga”, MOMAG 2008.
- [23] M. R. Silva, C. L. Nóbrega, A. M. Zenaide, P. H. F. da Silva, e A. G. D’Assunção, “Monopolos Circular e Elíptico de Microfita para Sistemas UWB”, SBRT 2008.

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)