

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UM MONOPOLO PARA APLICAÇÕES DE BANDA
ULTRALARGA (UWB) COM ELEMENTOS FRACTAIS

NELSON MATEUS FERREIRA SANTOS

DM 18 / 2015

UFPA / ITEC / PPGEE
Campus Universitário do Guamá
Belém-Pará-Brasil

2015

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

NELSON MATEUS FERREIRA SANTOS

PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UM MONOPOLO PARA APLICAÇÕES DE BANDA
ULTRALARGA (UWB) COM ELEMENTOS FRACTAIS

DM 18 / 2015

UFPA / ITEC / PPGEE
Campus Universitário do Guamá
Belém-Pará-Brasil
2015

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

NELSON MATEUS FERREIRA SANTOS

PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UM MONOPOLO PARA APLICAÇÕES DE BANDA
ULTRALARGA (UWB) COM ELEMENTOS FRACTAIS

Dissertação submetida à Banca Examinadora do Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica da UFPA para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica na área de Telecomunicações, elaborada sob a orientação do Prof. Dr. Gervásio Protásio dos Santos Cavalcante.

UFPA / ITEC / PPGEE
Campus Universitário do Guamá
Belém-Pará-Brasil

2015

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**“PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UM MONOPOLO PARA APLICAÇÕES DE
BANDA ULTRALARGA (UWB) COM ELEMENTOS FRACTAIS”**

AUTOR: NELSON MATEUS FERREIRA SANTOS

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA À BANCA EXAMINADORA
APROVADA PELO COLEGIADO DO PROGRAMA EM ENGENHARIA
ELÉTRICA, SENDO JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE
MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA NA ÁREA DE TELECOMUNICAÇÕES.

APROVADA EM: 08 DE MAIO DE 2015.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Gervásio Protásio dos Santos Cavalcante
(Orientador-PPGEE/UFPA)

Prof. Dr. Rodrigo Melo e Silva de Oliveira
(Avaliador Interno-PPGEE/UFPA)

Prof. Dr. Bruno Souza Lyra Castro
(Avaliador Externo ao Programa – CCAST/UFPA)

Prof. Dr. Fabrício José Brito Barros
(Avaliador Externo ao Programa – CAMTUC/UFPA)

VISTO:

Prof. Dr. Edvaldo Gonçalves Pelaes
(Coordenador do PPGEE/ITEC/UFPA)

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu bondoso Deus pelo dom da vida e a oportunidade de desfrutar o conhecimento que nosso mundo nos oferece. Durante todo esse trajeto ele foi minha base e mão amiga para acreditar em minhas decisões quando as dúvidas me tomaram conta.

Quando senti que devia continuar naquilo que acreditava, que era estudar mais e mais, havia uma certeza somente: minha família sempre estará comigo. Por isso agradeço de todo o meu coração pela presença de meus familiares: meus pais, Maria Miranil Ferreira Santos e José Mario Santos, minhas maiores referências em dignidade, honestidade, amizade e confiança, pois sempre me apoiaram, por mais que às vezes meus caminhos não fossem tão claros a eles; Meu irmão que amo e admiro pela pessoa íntegra e generosa não só a mim, mas para todos ao seu redor. Outra peça fundamental nessa minha base foi, e ainda é minha companheira Laísa Suelem Melo Costa, por estar do meu lado todos esses anos sendo uma pessoa maravilhosa e amorosa, me ensinando sempre como a vida tem algo de melhor pra desfrutar, bastando escolher sorrir junto dela. Obrigado de todo o meu coração. Amo vocês.

Gostaria de coração agradecer ao Prof. Gervásio Protásio Cavalcante pela oportunidade, sua amizade e companheirismo, seu profissionalismo e acima de tudo paciência para me auxiliar com tanta dedicação em diversos momentos dessa trajetória.

Ao Prof. Fabrício José Brito Barros, por aceitar me auxiliar neste trabalho, pelas contribuições de grande importância e, sobretudo pela grande amizade que isso nos resultou.

Aos excelentes professores que compõem o grupo de pesquisadores do LCT: Jasmine Araujo, Josiane Rodrigues, Bruno Lyra (Obrigado pela grande amizade), Simone Castro, Hermínio Gomes e a os diversos professores que tive o prazer de ser aluno em tempos de estudo, em especial ao Prof. Ronaldo Oliveira (IESAM) e ao Prof. Rodrigo Oliveira (PPGEE-UFPA).

Quanto aos companheiros de estudo, gostaria de agradecer a todos os componentes do LCT pela amizade nesses anos: Helio Oeiras (Fundamental na concepção desse trabalho, obrigado por sua amizade), Miércio Alcantra (amigo de anos, obrigado por toda sua ajuda), Allan Costa (Grande amigo que me ajudou a ingressar na pós-graduação, obrigado de coração), Alan Braga e João Vitor (dois grandes presentes que recebi nesse caminho), Michele e Lesley (obrigado pela ajuda nos pontos finais das medições e por sua amizade) e a todos os demais amigos (Regina Nazaré, Ramz Fraiha, Diego Kazuo, Walter Martins, Rita de Cassia, Waldney Barros, Hugo Cruz, André Carvalho, Charlene Souza).

Gostaria também de agradecer ao pesquisador André da UFRN que foi fundamental nas medições, juntamente do Prof. Adaildo Gomes por seu auxílio, mesmo sendo a distancia, sou muito grato aos dois. Meu muito obrigado de verdade.

Enfim, a todos os profissionais da UFPA por sua competência e honestidade dos seus trabalhos, pois são os que me permitiram chegar ate aqui e ajudando a tantos outros que escolherem a educação como sua arma nessa batalha em busca de uma sociedade mais bonita e justa.

SUMÁRIO

Lista de Ilustrações	9
Lista de Tabelas	12
Lista de Siglas	13
Resumo	14
Abstract	15
1. INTRODUÇÃO	16
1.1 Objetivo e metodologia	21
1.2 Organização do Texto	22
2. TEORIA DE ANTENAS	23
2.1 Parâmetros Fundamentais de Antenas	24
<i>2.1.1 Diagrama de Radiação</i>	24
2.1.2 Regiões de campo.....	26
<i>2.1.3 Intensidade de Radiação</i>	27
2.1.4 <i>Diretividade</i>	28
2.1.5 <i>Ganho</i>	28
2.1.6 <i>Impedância de Entrada</i>	28
2.1.7 <i>Largura de Banda</i>	29
2.1.8 <i>Perda de retorno</i>	31
2.1.9 <i>Coefficiente de Reflexão</i>	31
2.1.10 <i>VSWR (Voltage standing wave ratio) ou ROE (Relação de onda estacionária)</i>	32
2.2 Antenas Filamentares	32
2.2.1 <i>Dipolo de meio comprimento de onda</i>	33
2.2.2 <i>Monopolo de um quarto de comprimento de onda</i>	35
2.3 Antenas de microfita	37
2.4 Considerações Finais	38

3. ANTENAS FRACTAIS.....	39
3.1 Geometria Fractal.....	39
3.2 Fractal e Antenas	44
3.3 Método Sistema Iterativo de Funções (IFS) na geração de fractais.....	46
3.4 Curvas fractais	47
3.4.1 Curva de Koch.....	47
3.4.2 Curva de Minkowski	48
3.4.3 Curva de Hilbert.....	49
3.4.4 O Triângulo de Sierpinski	49
3.5 Considerações Finais	50
4. PROJETO E SIMULAÇÃO DA ESTRUTURA PROPOSTA	51
4.1 Geometria da antena	52
4.2 Resultados e discussão.....	61
4.3 Considerações finais	69
5.CONFECCÃO E MEDIÇÕES DO PROTÓTIPO	70
5.1 Processos de confecção da antena proposta	70
5.2 Medições e comparação dos resultados.	73
5.3 Considerações Finais	75
6. CONCLUSÕES.....	76
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	78

Lista de Ilustrações

Figura 2.1 Diagrama bidimensional normalizado de potência em dB de um dipolo $\lambda/2$..	25
Figura 2.2 Sistema de coordenadas esféricas para análise de antenas.	25
Figura 2.3 Típicas variações na forma de um diagrama de amplitude de antena entre as regiões de campo próximo reativo e do campo distante.	26
Figura 2.4 Regiões de campo de uma antena	27
Figura 2.5 Gráfico de perda de retorno utilizado para definir a largura de banda.....	30
Figura 2.6 Tabela de conversão entre perda de retorno, SWR, GAMMA, Potência Transmitida e Potência Refletida.....	31
Figura 2.7 Dipolo de meio comprimento de onda.....	33
Figura 2.8 Distribuição de corrente ao longo do comprimento do Dipolo de meio comprimento de onda.....	34
Figura 2.9 Simulação da distribuição de um monopolo de meio comprimento no CST..	34
Figura. 2.10 Diagrama tridimensional do dipolo de meio comprimento de onda.....	35
Figura 2.11 Distribuição de corrente em uma antena monopolo $\lambda/4$ sobre um plano terra infinito.....	35
Figura 2.12 Monopolo de $\lambda/4$ sobre um plano terra infinito	36
Figura 2.13 Diagrama de radiação do monopolo de $\lambda/4$ sobre um plano terra infinito ...	36
Figura 2.14 Antena de Microfita	37
Figura 3.1 Conjunto de Mandelbrot.....	41
Figura 3.2 Classe dos Fractais	42
Figura 3.3 Exemplos de Fractais não lineares (Obtidos com o conjunto de Mandelbrot e de Julia, respectivamente).....	42
Figura 3.4 Exemplos de Fractais encontrados na natureza.....	43
Figura 3.5 Transformações afins de um quadrado.	46
Figura 3.6 Estágios da Curva de Von Koch.	47
Figura 3.7 Curva de Minkowski aplicado em um quadro.	48
Figura 3.8 Estágios do processo de geração da Ilha de Minkowski.....	48

Figura 3.9 Estágios de geração de iterações da curva de Hilbert	49
Figura 3.10 Estágios de geração de iterações do triangulo de Sierpinski.....	49
Figura 4.1 Geometria do Monopolo inicial (a).....	54
Figura 4.2 Geometria do Monopolo inicial (b).	54
Figura 4.3 Antena Monopolo hexagonal no CST.	55
Figura 4.4 Pulso Gaussiano modulado no domínio do tempo.	56
Figura 4.5 Espectro do Pulso Gaussiano modulado.	56
Figura 4.6 Processo de geração do pulso fractal de Peano.	57
Figura 4.7 Monopolo após a aplicação da curva fractal de Peano.....	57
Figura 4.8 Monopolo após a aplicação da curva fractal de Peano no CST.....	58
Figura 4.9 Processo de geração do pulso fractal de Koch em três iterações.....	59
Figura 4.10 Floco de neve de Koch.	59
Figura 4.11 Monopolo após a fractalização do plano terra.	60
Figura 4.12 (a) Monopolo após a aplicação da curva fractal de Peano no CST e (b) Plano terra modificado com a curva fractal no CST.	60
Figura 4.13 Perda de retorno simulada do monopolo inicial M0.....	61
Figura 4.14 Perda de retorno simulada do monopolo M1.	62
Figura 4.15 Perda de retorno simulada do monopolo M2.	63
Figura 4.16 Perdas de retorno na forma inicial M0, M e M2.....	64
Figura 4.17 Distribuição de corrente em M0.	65
Figura 4.18 Distribuição de corrente em M1.	65
Figura 4.19 Distribuição de corrente em M2.	65
Figura 4.20 Distribuição de corrente em M2.	66
Figura 4.21 Diagrama de radiação tridimensional da antena M0.	66
Figura 4.22 Diagrama de radiação polar da antena M0.....	67
Figura 4.23 Diagrama de radiação tridimensional da antena M1.	67
Figura 4.24 Diagrama de radiação polar da antena M1.....	68

Figura 4.25 Diagrama de radiação tridimensional da antena M2.	68
Figura 4.26 Diagrama de radiação polar da antena M2.	69
Figura 5.1 Folha adesiva com o protótipo impresso.	71
Figura 5.2 Processo de corrosão da placa metálica.	71
Figura 5.3 Imagem da face frontal do protótipo.	72
Figura 5.4 Imagem da face traseira do protótipo.	72
Figura 5.5 Setup de medição da antena proposta.	73
Figura 5.6 Perda de retorno (S11) medida.	74
Figura 5.7 Comparativo da perda de retorno medida com a simulada.	74

Lista de Tabelas

Tabela 4.1. Propriedades do material escolhido	52
Tabela 4.2. Dimensões do monopolo inicial	53
Tabela 5.1. Material utilizado na confecção da antena	70
Tabela 5.2. Comparativo das faixas de frequência simuladas e medidas com a faixa UWB pretendida	75

Lista de Siglas

GSM	Global System for Mobile Communications
TDMA	Time Division Multiple Access.
IMT-2000	International Mobile Telecommunications-2000.
UMTS	Universal Mobile telecommunications System.
HSPA	High Speed Packet Access.
TD-SDMA	Time Division Synchronous Code Division Multiple Access.
WIMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access.
LTE	Long Term Evolution.
ANATEL	Agencia Nacional de Telecomunicações.
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers.
WLAN	Wireless Local Area Network.
GPRS	General Packet Radio Service.
PCS	Personal Communications Service.
UWB	Ultra Wideband.
FCC	Federal Communications Commission.
VSWR	Voltage Stand Wave Ratio.
ROE	Relação de onda estacionária.
IFS	Iterative function system.
CST	Computer Simulation Technology.
FR-4	Flame Retardant.
PEC	Condutor Elétrico Perfeito
LB	Largura de Banda.
FSS	Superfície Seletiva de Frequência.
FDTD	Diferenças Finitas no Domínio do Tempo.
LCT	Laboratório de Computação e Telecomunicações
UFPA	Universidade Federal do Para.
UFRN	Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

RESUMO

Este trabalho descreve o projeto e análise de uma antena do tipo monopolo impresso. A forma geométrica inicial na antena do monopolo impresso é de um hexágono regular, de segmentos com 9 mm de comprimento. A proposta inicial é de uma antena para atender a faixa UWB (3,1 a 10,6 GHz). Para alcançar uma largura de banda que satisfaça o problema proposto, foi implantado curvas fractais (curva de Peano e a curva de Koch) na composição da geometria do monopolo e do plano terra, respectivamente, onde a introdução dessas curvas geram ressonâncias adicionais, assim otimizando a largura de banda e atendendo as especificações de sistemas UWB. Para realizar as análises foi utilizado o software CST MICROWAVE STUDIO®, este que é baseado no método de integração finita no domínio do tempo, que nos dispõe do ambiente computacional para simular as propriedades da antena e o comportamento eletromagnético da mesma como resultados dessas simulações, que nos apresentou uma nova faixa de frequência indo de 2,74 a 11,5 GHz, satisfazendo a faixa dos sistemas UWB. Como ultimo passo, foi confeccionado um protótipo e realizadas as medições com o equipamento adequado para a comparação dos resultados medidos com os simulados, abrangendo uma faixa de frequência de 3,2 a 13,5 GHz, onde essa faixa de resultados mostra uma concordância com os simulados, validando o modelo proposto.

Palavras-chave: antena fractal, ultra wide band , perda de retorno, curva de Peano, Curva de Koch.

ABSTRACT

This work describes the design and analysis of antenna monopole printed type. The initial geometry in the printed monopole antenna is of a regular hexagon, with 9 mm segments in length. The initial proposal is an antenna to serve the UWB range (3.1 to 10.6 GHz). To achieve a bandwidth satisfying the proposed problem, fractal curves (Peano curve and the Koch curve) were implemented in the geometry composition of the monopole and the ground plane, respectively, the introduction of these curves generate additional resonances, optimizing bandwidth and serving the specifications of UWB systems. To perform the analyzes, CST Microwave Studio ® software was used, which is based on finite integration method in the time domain, having the computing environment to simulate the antenna properties and the electromagnetic behavior of the same as the results of these simulations, a new frequency range going from 2.74 to 11.5 GHz is presented, satisfying the range of UWB systems. As a last stage, a prototype was made and the measurements with the proper equipment to compare the measured results with the simulated were realized, covering a frequency range from 3.2 to 13.5 GHz, where the range of results shows concordance with the simulated, validating the model.

Keywords: Fractal antenna, ultra wide band, return loss, Peano curve, Koch curve.

CAPITULO 1

INTRODUÇÃO

Os numerosos avanços nos sistemas de comunicações móveis na última década têm ofertado um acesso à informação com velocidades significativamente altas. A ambição de tráfego de voz e dados com eficiência e confiabilidade, segue regendo o foco de estudos de novas aplicações e técnicas para aprimorar a capacidade das redes móveis e na transmissão desses dados. A popularização dos *Smartphones* e de outros dispositivos móveis também contribui para essa mudança constante, pois hoje não são mais exclusivamente usados para transmissão de voz.

O início da década de 90 foi um prólogo do avanço das comunicações digitais móveis, pois foi neste período que iniciou a transição das redes móveis, antes analógicas, para redes totalmente digitais, inicialmente para aumentar o número de ligações simultâneas e melhor qualidade e capacidade na rede. O padrão europeu GSM (*Global System for Mobile Communications*) TDMA (*Time Division Multiple Access*) e o *cdmaOne* são algumas das tecnologias de segunda geração, sendo o GSM o padrão que se tornou o maior representante do chamado padrão 2G [1,2].

Esse novo padrão foi um avanço significativo, porém as taxas de transferências de bits atingidas eram baixas, impossibilitando a implantação de novos serviços que necessitavam de taxas maiores. Em conjunto a essas necessidades técnicas, o perfil de usuários também foi um catalisador para um esforço maior da comunidade científica em aprimorar os padrões de transmissão. Os usuários já não se limitavam somente a realizar chamadas de voz, também desejavam acesso à internet com alta velocidade, serviços multimídias variados dentre outras aplicações.

Esse almejo começou a ser atendido a partir do início do século XXI, pois nesse período foi especificado para a implantação um padrão de comunicações sem fio de terceira geração. O projeto IMT-2000 (*International Mobile Telecommunications-2000*), definido pelo ITU (*International Telecommunication Union*), aprovou esses novos modelos de transmissão de radio, definindo seus requisitos mínimos e restrições para o funcionamento do mesmo [3,4]. A partir da visão apresentada nesse projeto, as grandes empresas do ramo de telecomunicações, em conjunto com centros de pesquisas e órgãos reguladores iniciaram pesquisas para desenvolver as tecnologias que atendessem os requisitos do padrão 3G [1,4].

As principais características das tecnologias 3G são [1]-[5]:

- Suporte a um número maior de clientes para transmissão de voz e dados;
- Maiores taxas de transferência de dados (384 kbits/s para sistemas móveis e 7 Megabits/s para sistemas estacionários) a um custo menor que as redes 2G;
- Oferece serviços multimídia (Internet móvel de alta velocidade, vídeo chamadas).

As tecnologias que atenderam ao padrão do 3G foram as seguintes:

- UMTS (*Universal Mobile telecommunications System*);
- HSPA (*High Speed Packet Access*), da família GSM (*Global System Mobile*);
- TD-SDMA (*Time Division Synchronous Code Division Multiple Access*);
- WIMAX (*Worldwide Interoperability for Microwave Access*);
- LTE (*Long Term Evolution*), uma evolução do padrão 3G, possibilitando uma taxa de transferência de dados de 5-12 Mbps, sendo popularmente conhecido como 3G MAX ou 3,5G.

A ANATEL (Agência Nacional de Telecomunicações) assinou no dia 16 do mês de outubro de 2012 os termos de autorização do uso das frequências na faixa de 2.500 MHz a 2.690 MHz para a implantação das tecnologias para a quarta geração de telefonia móvel [6]. O cronograma da implantação do sistema 4G no Brasil encontra-se em um momento crucial para a expansão da rede, pois no final do mês de setembro de 2014 foi realizado o leilão dos lotes na faixa de 700 MHz para uso das operadoras de telecomunicações, faixa esta que ainda está sendo utilizada pelo sistema de transmissão de televisão analógica aberta e está a caminho de ser desocupada, seguindo os prazos do cronograma de implantação do sistema de TV digital aberta [7]. Essa faixa é considerada mais interessante para a transmissão, pois por se tratar de uma faixa de frequência mais baixa, em comparação a faixa de 2,5 GHz, o alcance da propagação é consideravelmente maior, exigindo, conseqüentemente, uma rede com menos estações base para realizar a mesma cobertura. Isso implica consideravelmente nos custos da implantação dos sistemas [8]. A expectativa, de acordo com o cronograma da ANATEL, é do sistema 4G operando em todas as cidades com mais de 30 mil habitantes até dezembro de 2017.

Podemos definir o sistema 4G como uma rede de banda larga móvel (sem fio), com tecnologia toda baseada em IP (Internet Protocol) permitindo uma convergência entre as redes sem fio e redes cabeadas, provendo acesso em alta velocidade de dispositivos eletrônicos, computadores entre outros [5]. O grande atrativo deste novo conceito de rede é que a mesma permite novos níveis de experiência para o usuário final, junto de um novo leque de serviços multimídia com grande variedade, onde esses serviços eram até então acessíveis somente na banda larga fixa. A passagem dessa fronteira permite melhoria na qualidade de vida dos usuários em diversos ramos, como o cultural, acesso a serviços públicos entre vários outros exemplos [2,3].

As tecnologias que compõem os sistemas 4G são: o LTE-Advanced (*Long Term Evolution*) e Wimax (*Worldwide Interoperability for Microwave Access*) IEEE 802.16m, que promovem taxas de transferências de dados elevadas, na estimativa de 100 Mbps em movimento e 5 Gbps em repouso, mantendo uma qualidade de serviço (QoS) satisfatória e de alta confiabilidade e segurança para a utilização de diversos serviços [2]. A grande variedade de serviços oferecidos é possível devido a uma característica muito atrativa do LTE: ele abrange múltiplas faixas de frequência, onde os serviços móveis utilizados atualmente estão alocados (por exemplo, GSM - *Global System for Mobile Communications*, GPRS - *General Packet Radio Service*, IMT-2000 – *Internacionais Mobile Communications*, Wi-Fi - *Wireless Fidelity*, *Bluetooth*) [5,9].

Este contexto histórico nos mostra um grande salto na maneira habitual em que o usuário desfruta do consumo da informação, e essa variedade de novos serviços implicaram na convergência dos mesmos em um mesmo dispositivo móvel, sendo uma realidade que já nos é contemplada. A proposta de dispositivos que agregam diversas aplicações carrega uma necessidade que impulsiona pesquisas na área de projetos de antenas: antenas que operam em diferentes faixas de frequências que atendem essa diversidade de funções sem fio.

Uma solução bem atrativa para atender este tipo de proposta são as antenas de banda ultra larga (*Ultra Wideband -UWB*), que tratam-se de antenas que podem efetivamente substituir antenas com múltiplas ressonâncias mas de largura de banda estreita. Este tipo de sistema dispõe de uma enorme largura de banda em comparação a outras aplicações comerciais [10].

A comunicação em banda ultralarga refere-se à transmissão de sinais que possuem espectro em frequência consideravelmente grande, sendo representados no domínio do tempo por pulsos de pequena duração.

Uma definição apropriada para largura de banda de sinais UWB é representada pela largura de banda fracional definida como:

$$B = 2 \frac{f_f - f_i}{f_f + f_i} \quad 1.1$$

Onde f_i e f_f são os pontos de frequência inicial e final 10dB abaixo do pico do espectro do sinal, respectivamente.

Todos os parâmetros e especificações para aplicações comerciais que definem os sistemas UWB foram estabelecidas em 2002 pela Comissão Federal de Comunicação dos Estados Unidos (*Federal Communications Commission - FCC*) [11], definindo que o sinal UWB é um sinal que possui largura de banda fracional maior que 0,2 ou uma largura de banda ($f_f - f_i$) maior que 500 MHz.

O estudo sobre sistemas que transmitem sinais em banda ultra larga é um tópico emergente no campo da comunicação, pois somente em fevereiro de 2002, o FCC permitiu a transmissão de sinais UWB em espectro regulamentado, caso certas condições de potência fossem satisfeitas.

Desde então, a atenção e interesse para este tipo de antenas cresceu substancialmente na comunidade científica, fato esse devido as principais características delas, que são muito atrativas nas comunicações de curta distância [46-48]:

- Altas taxas de transmissão de dados (até 100 Mbps);
- Excelente imunidade a interferências de múltiplos caminhos (interferência multipercurso);
- Baixa complexidade e custo de fabricação;
- Coexistência com outros tipos de tecnologias sem fio.

Outro tipo de antenas que se enquadram em algumas dessas características são justamente os monopolos planares, pois são de fácil fabricação devido a suas estruturas não exigirem altas complexidades e baixo custo. Também apresentam características de banda larga e são omnidirecionais. Devido a esses atrativos, monopolos planares são muito eficientes para serem usados em sistemas UWB. Atividades e pesquisas emergentes de diversas geometrias dos monopolos para estes atenderem os requisitos do sistema é um grande foco nos últimos anos.

Sistemas UWB foram restritamente e extensamente usados entre as décadas de 60 a 90 como aplicações militares (radares; sensoriamento; programas classificados como comunicações militares altamente seguras). No entanto, este tipo de aplicação teve seu momento substancialmente importante em fevereiro de 2002 com a definição da FCC.

Essa decisão descreve que sistemas UWB poderiam ser utilizados para aplicações comerciais, mais precisamente comunicações de dados, bem como aplicações em radar e de segurança, sendo essa decisão emitida que estabeleceu os parâmetros e especificações do sistema [11].

A faixa de frequência que foi atribuída ao sistema pela FCC vai de 3,1 a 10,6 GHz, nos oferecendo uma largura de banda de 7,5 GHz, certamente a maior alocação de banda para uma aplicação comercial terrestre. As principais vantagens que contribuem para o grande potencial deste tipo de sistema se destacam a capacidade de atingir elevadas taxas de dados, imunidade a interferências provenientes de múltiplos percursos do sinal entre o emissor e o receptor, utilização de dispositivos de baixa potência, baixa complexidade e custo na fabricação das antenas e a coexistência com outros tipos de tecnologias sem fio disponíveis no mercado.

Este cenário atual que nos é apresentado fomentou um mercado com grande variedade de serviços oferecidos. Consequentemente, uma grande expansão na pesquisa e produção de equipamentos eletrônicos cada vez mais sofisticados e a preços mais acessíveis atendem a demanda deste grande mercado. Dentre os interesses que despertam a atenção dos pesquisadores da indústria na área das telecomunicações, um em especial é sempre primordial: Dispositivos que sejam leves, compactos e com custos baixos.

Tratando-se do ramo de engenharia de antenas, o mesmo interesse é compartilhado, pois diversas soluções são estudadas e desenvolvidas para a confecção de irradiadores que operem em múltiplas faixas de frequências (multi-banda) e um campo relativamente novo tem se mostrado bem promissor é de Antenas Fractais, onde esta consiste em combinar geometrias fractais com teoria de antenas [12].

O conceito de Fractal foi inicialmente introduzido em 1975, pelo matemático polonês Benoit B. Mandelbrot, enquanto buscava descrever matematicamente as dimensões de diversas formas encontradas na natureza, pois, a geometria euclidiana não era o suficiente para tal objetivo [13,14].

Podemos definir fractais como objetos construídos recursivamente, onde em qualquer iteração, algum pedaço do objeto é uma versão em escala reduzida do objeto na iteração anterior [15].

Estruturas fractais são interessantes para aplicações em estruturas planas. As geometrias fractais possuem duas propriedades que lhe caracterizam: o preenchimento do espaço e auto-similaridade [16]. A propriedade de preenchimento de espaço implica em um crescimento do comprimento elétrico da antena, implicando em um maior percurso da corrente elétrica ao longo da superfície, resultando, conseqüentemente, em uma redução na frequência de ressonância. Com esse deslocamento da frequência de ressonância, é possível modelar uma antena com suas dimensões reduzidas [17].

Em resumo, a aplicação de geometrias fractais é extremamente vantajosa para a geração de múltiplas ressonâncias ou na melhoria da largura de banda [18].

1.1 Objetivo e metodologia

O objetivo desse trabalho consiste no projeto de um monopolo impresso para a utilização em aplicações de banda ultralarga (*Ultra Wideband* - UWB). Para a otimização nos níveis de reflexão e largura de banda, foram aplicados elementos fractais nos contornos da antena, em específico, foi aplicada a curva fractal de Giuseppe Peano no contorno do monopolo inicial e como complemento, aplicamos também a curva fractal de Koch em uma das dimensões do plano terra, com isso, foi investigada a influência dessa aplicação na resposta em frequência.

Para a realização desse estudo, a antena proposta foi modelada no ambiente virtual do software simulador CST MICROWAVE STUDIO® 2010, que nos permite simular os parâmetros físicos da antena e obter os resultados a partir das equações de Maxwell. Os resultados apresentados demonstraram a qualidade na aplicação de curvas fractais como um incremento na largura de banda desse tipo de antenas. Com a finalidade de validar os resultados obtidos nas simulações, o protótipo da antena proposta foi confeccionado e em conjunto foi realizado uma campanha de medições nos níveis de perda de retorno aonde os resultados vão ao encontro dos obtidos em simulação, garantindo a validade do método.

1.2 Organização do Texto

O presente trabalho encontra-se dividido em 6 capítulos, onde é apresentado ao leitor uma reunião de fontes para um rico referencial teórico para o estudo das estruturas propostas, seguido pela análise dos resultados obtidos das antenas propostas confeccionadas em comparação com as modeladas em ambiente computacional.

Os assuntos referentes a cada capítulo são os seguintes:

- Capítulo 1: introdução ao trabalho proposto, sua motivação e objetivos, assim como uma revisão da literatura específica;
- Capítulo 2: desenvolvem-se os conceitos fundamentais sobre a teoria básica de antenas a serem empregadas nesse estudo e são comentados alguns artigos que compõe o estado da arte da dissertação;
- Capítulo 3: é apresentado um estudo das geometrias fractais, evidenciando sua evolução histórica no ramo de engenharia de antenas, os fundamentos e características das curvas apresentadas e exemplos de aplicações.
- Capítulo 4: abordaremos quanto ao detalhamento do projeto no ambiente da simulação, onde as especificações da antena e as modificações propostas são analisadas de acordo com os resultados mostrados nessas simulações;
- Capítulo 5: trata do detalhamento do processo de confecção e montagem do protótipo da antena fractal proposta e os procedimentos práticos para obtenção dos resultados;
- Capítulo 6: conclusões;

CAPÍTULO 2

TEORIA DE ANTENAS

O objetivo deste capítulo é apresentar os princípios fundamentais da teoria de antenas que são de relevância para o desenvolvimento desta dissertação. Esses princípios que serão destacados são de grande importância devido a uma grande variedade de possibilidades de projetos para construção de antenas, servindo como referência inicial e ponto de partida para a aplicação desses projetos.

Podemos definir uma antena, de acordo com a norma IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) Definições Padronizadas e Termos para antenas (*IEEE Standard Definitions of Terms for Antennas – IEEE Std 145-1983*), como “um dispositivo para a radiação ou a recepção de ondas de rádio” [19]. Em outros termos, antenas são as estruturas intermediárias entre o espaço livre e o guia de onda ou linha de transmissão, convertendo as correntes elétricas em campos de rádio-frequência [20]. Este guia de onda, ou linha de transmissão, é utilizado para transportar a energia eletromagnética da fonte de transmissão em direção à antena, podendo ser também no sentido inverso dependendo da situação apresentada. Quando o sentido da energia eletromagnética é da fonte à antena, chamamos de transmissora, já no sentido inverso chamamos de receptora.

A diversidade de serviços que utilizam comunicação sem fio presentes no cotidiano fomentam as pesquisas de projetos de antenas que atendam aos padrões de transmissão, como os sistemas de Rádio e TV aberta (Analógicos e Digitais), Redes Celulares, sistemas via Satélite, entre outros. Cada uma dessas aplicações exigem particularidades que devem ser levadas em conta durante o desenvolvimento do projeto da antena que vai trabalhar no sistema proposto. Dentre os pontos a serem considerados no início de qualquer projeto, os mais levados em consideração são: alcance da área de cobertura, largura de banda satisfatória, uma boa relação de custo e benefício, fácil construção.

A função das definições dos parâmetros da antena que será projetada tem um papel crítico nos dias de hoje. É possível prever o desempenho de um sistema de antenas com alta precisão e confiabilidade nos dias de hoje, através da manipulação de parâmetros já predefinidos e normatizados pelo IEEE, permitindo um máximo funcionamento do sistema nas condições apresentadas. As características de radiação das antenas são relacionadas com esses parâmetros, dos quais alguns são inter-relacionados, mas nem todos são necessários para especificar o seu desempenho.

Podemos destacar alguns desses parâmetros: diagrama de radiação, regiões de campo, intensidade de radiação, diretividade, ganho, impedância de entrada, largura de banda, perda de retorno e coeficiente de reflexão.

Neste capítulo, é apresentada uma revisão teórica desses conceitos que definem esses parâmetros, com um estudo voltado às antenas dipolo de meio comprimento de onda e monopolo de quarto de onda, pois são antenas que servem até hoje como base de projetos e suas características delas tornaram-nas em antenas amplamente usadas e versáteis.

2.1 Parâmetros Fundamentais de Antenas

2.1.1 Diagrama de Radiação

Definimos diagrama de radiação como uma representação gráfica, em duas ou três dimensões, das propriedades de uma antena em função das coordenadas espaciais [20]. Na maioria dos casos o diagrama de radiação é representado para a região de campo distante, que será definido posteriormente, e são normalizados e expressos em decibéis (dB).

Os projetos de antenas resultam os mais variados tipos de diagramas, mais por fins de classificação há três tipos principais: isotrópico, direcional e omnidirecional.

Uma antena isotrópica exibe um diagrama que irradia energia uniformemente em todas as direções, sem perdas, sendo um caso de uma antena ideal, impossível de se obter na prática. Uma antena direcional tem a particularidade de transmitir ou receber ondas eletromagnéticas com mais eficiência em uma determinada direção em relação às outras.

Por fim, uma antena omnidirecional possui um diagrama direcional em um plano e a energia transmitida na direção ortogonal é nula. Com o diagrama de radiação, podemos ilustrar a distribuição espacial do campo, o comportamento da distribuição da potência ao longo da antena para o meio externo. Podemos utilizar o diagrama como auxílio na compreensão de outros conceitos, como ganho e diretividade e polarização.

A figura 2.1 ilustra exemplifica um diagrama bidimensional de um dipolo de meio comprimento de onda, juntamente da Figura 2.2, que exemplifica um diagrama de radiação na forma tridimensional, utilizando um sistema de coordenadas esféricas. Em geral, esses diagramas de campo e potência são normalizados em relação ao seu valor máximo.

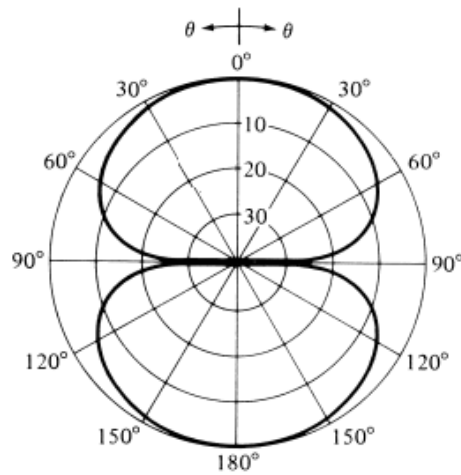


Figura 2.1 Diagrama bidimensional normalizado de potência em dB de um dipolo $\lambda/2$

Na prática, um diagrama tridimensional é medido e gravado como uma série de diagramas bidimensionais. Conforme a Figura 2.2, o diagrama de radiação tem suas porções, que chamamos de lóbulos (ou lóbos). Essas porções são de grande utilidade na interpretação das características de radiação da antena referida no diagrama. Podemos classificar os lóbulos da seguinte forma: Principal, sendo o que contém a direção de máxima radiação (no caso da figura 2.2 ele aponta para a direção $\theta = 0$); secundários, qualquer outro lóbulo em exceção do principal (são em geral indesejáveis e para um melhor desempenho da antena, devem ser minimizados); Posterior, é um lóbulo cujo o ângulo da sua direção é de aproximadamente 180° em relação ao principal.

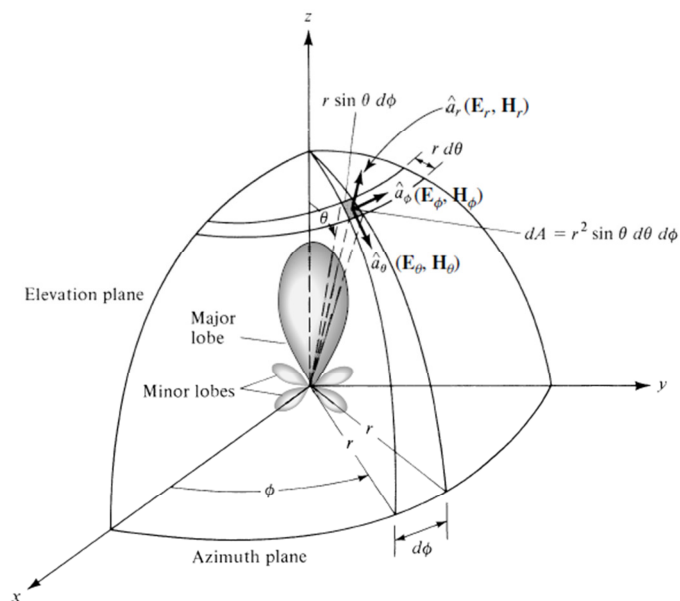


Figura 2.2 Sistema de coordenadas esféricas para análise de antenas[20].

2.1.2 Regiões de campo.

Podemos fazer uma classificação da região que envolve uma antena. Subdividimos a região em três: Região de campo próximo reativo, região de campo próximo radiante (região de Fresnel) e região de campo distante (região de Fraunhofer) [20].

Definimos região de campo próximo reativo como “a porção de campo próximo imediatamente ao redor da antena, onde predomina o campo reativo”. Região de campo próximo radiante (região de Fresnel) é “a região intermediária entre a região de campo próximo reativo e a região de campo distante, onde predomina o campo radiante e a distribuição angular dos campos depende da distância à antena”. Por fim, definimos a região de campo distante (região de Fraunhofer) como “a região de campo de uma antena onde a distribuição angular dos campos já é independente da distância à antena”. As figuras 2.3 e 2.4 ilustram as fronteiras das regiões de campo e as variações na forma do diagrama de radiação em função da distância, respectivamente.

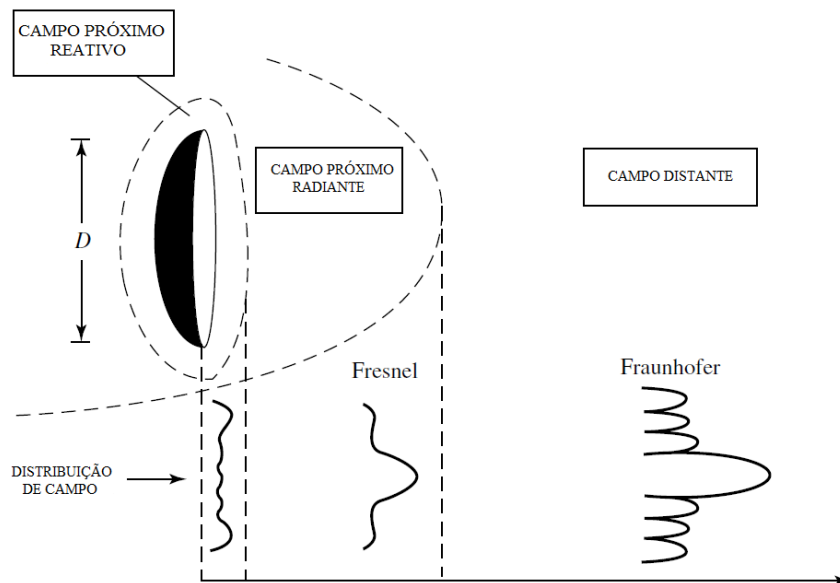


Figura 2.3 Típicas variações na forma de um diagrama de amplitude de antena entre as regiões de campo próximo reativo e do campo distante [20].

As fronteiras das regiões são estabelecidas por diversos critérios, onde o resultado mais comumente trabalhado é com as seguintes expressões: a fronteira interna da região de Fresnel é a distância $R_1 \geq 0,62/\sqrt{D^3/\lambda}$ e a fronteira externa é a distância $R_2 < 2D^2/\lambda$ onde

os parâmetros D é a máxima dimensão da antena e λ é o comprimento de onda, sendo que essas expressões só tem validade se este D for grande em comparação ao comprimento de onda ($D > \lambda$) [20].

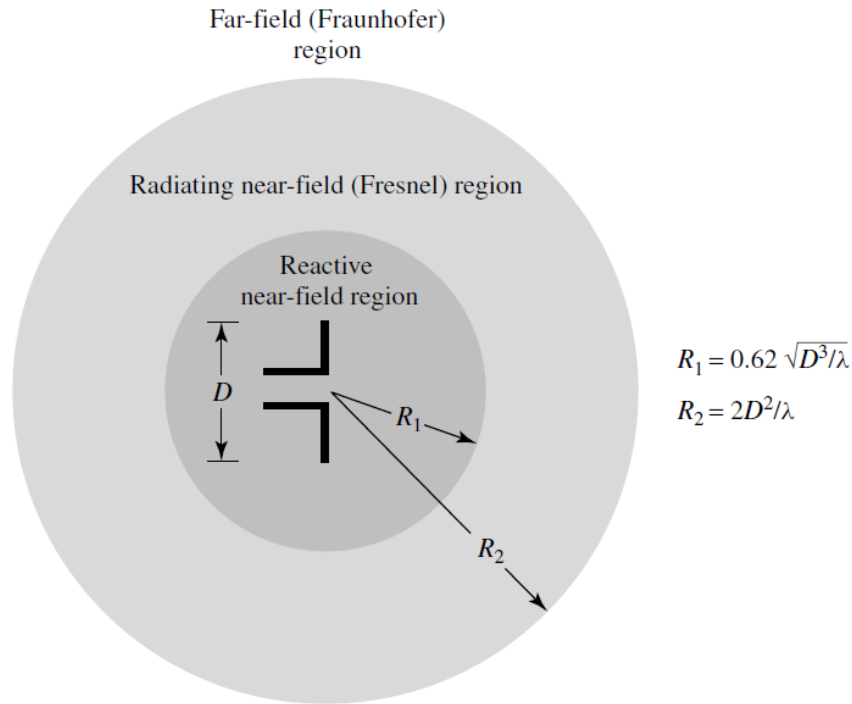


Figura 2.4 Regiões de campo de uma antena [20]

2.1.3 Intensidade de Radiação.

Intensidade de radiação é definida como a razão entre a potência radiada pela antena por unidade de ângulo sólido e a potencia total irradiada pela mesma, dado por (2-1) [20].

$$U = r^2 W_{rad} \quad 2.1$$

A potência total irradiada é obtida pela integração da intensidade de radiação em todo ângulo solido de 4π , sendo dado por:

$$P_{rad} = \oint U d\Omega = \int_0^{2\pi} \int_0^\pi U \sin\theta d\theta d\phi \quad 2.2$$

Sendo: $d\Omega$ - elemento de ângulo sólido = $\sin \theta d\theta d\phi$.

2.1.4 Diretividade.

Definimos diretividade como a razão entre a intensidade de radiação em uma determinada direção, sobre a intensidade média em todas as direções. Este é um parâmetro de grande importância para a medição da concentração de potência radiada em uma direção específica. A intensidade de radiação média é a potência total radiada dividida por 4π [20]. É dada por:

$$D = \frac{U}{U_0} = \frac{4\pi U(\theta, \phi)}{P_{rad}} \quad 2.3$$

Sendo: U_{max} - Intensidade de radiação máxima.

U_0 - Intensidade de radiação de uma antena isotrópica.

2.1.5 Ganho.

Um parâmetro muito utilizado na análise de desempenho de antenas é o ganho, sendo definido como a razão entre a intensidade de radiação, em uma dada direção, e a intensidade de radiação obtida se a potência total na entrada da antena [20]. Existem dois tipos de ganho: Ganho absoluto e Ganho relativo.

$$G = 4\pi \frac{\text{Intensidade de radiação}}{\text{Potência total de entrada}} = 4\pi \frac{U(\theta, \phi)}{P_{in}} \quad 2.4$$

Relacionamos a potência total radiada com a potência total de entrada com a eficiência de radiação (e_{cd}).

$$P_{rad} = e_{cd} P_{in} \quad 2.5$$

Onde: P_{in} , é a potencia total de entrada,
 e_{cd} , a eficiência de radiação.

2.1.6 Impedância de Entrada.

O conceito de impedância de entrada refere-se a impedância de tensão e corrente encontradas nos terminais de entrada da antena, ou a razão entre tensão e corrente nos

terminais de entrada da antena, ou a razão entre componentes apropriados de campos elétricos e magnéticos em um ponto [20]. A parte real da impedância da antena representa a potência que foi irradiada ou refletida, já a parte imaginária ilustra a energia que foi armazenada no campo próximo da antena. Podemos determinar esta impedância com a seguinte expressão:

$$Z_A = R_r + R_L + jX_A \quad 2.6$$

Onde: Z_A = Impedância de entrada da antena em (ohms)

R_r = Resistência de radiação da antena em (ohms)

R_L = Resistência de perda da antena em (ohms)

jX_A = Reatância da antena em (ohms)

O conhecimento desse parâmetro é fundamental para garantir o máximo de transferência da energia oriunda da fonte e guiada pela linha de transmissão até a antena, sendo que as impedâncias, tanto da linha como a da antena, devem ser a mesma. Se os valores das impedâncias apresentarem disparidades haverá reflexões da energia transmitida, causando instabilidade no sistema e até mesmo o risco dessa energia causar danos no transmissor.

Outros parâmetros auxiliam nas medições dos níveis de ondas estacionárias de tensão e corrente (ondas refletidas devido ao descasamento das impedâncias) são de fundamental importância para a eficiência do sistema. A seguir descreveremos os seguintes parâmetros: Largura de banda, perda de retorno, coeficiente de reflexão e VSWR (*Voltage Standing Wave Ratio – Razão de Tensão de Onda Estacionária*).

2.1.7 Largura de Banda

Pode-se definir como largura de banda (LB) de uma antena como uma gama de frequências na qual o sistema pode irradiar ou receber energia corretamente. Dependendo das necessidades que o sistema exigir, a largura de banda pode ser o parâmetro decisivo na escolha da antena a ser utilizada. Diversos parâmetros delimitam a largura de banda, tais como: impedância de entrada, ganho, largura de feixe, direção do lóbulo principal nível dos lóbulos secundários e polarização. Podemos obtê-la pelas seguintes maneiras:

- a) Forma percentual, quando a largura de banda é relativamente menor em relação a frequência central, dado por [21]:

$$LB = \frac{(f_s - f_i)}{f_c} \times 100 \quad 2.7$$

- b) Pelo relacionamento entre as frequências superior e inferior, sendo a superior ou igual ao dobro da frequência inferior, temos:

$$LB = \frac{f_s}{f_i} \quad 2.8$$

- c) Em função do fator de qualidade total da antena e do seu VSWR, conforme [19], dado em percentual:

$$LB = \frac{(VSWR - 1)}{Q_t \sqrt{VSWR}} \times 100 \quad 2.9$$

sendo: f_s - frequência superior;

f_i - frequência inferior;

f_c - frequência central;

Q_t - fator de qualidade total da antena;

VSWR - coeficiente de onda estacionaria.

A figura 2.5 ilustra um gráfico da perda de retorno em função da frequência onde podemos observar o exemplo de como visualizar a largura de banda medida na frequência central 2 GHz.

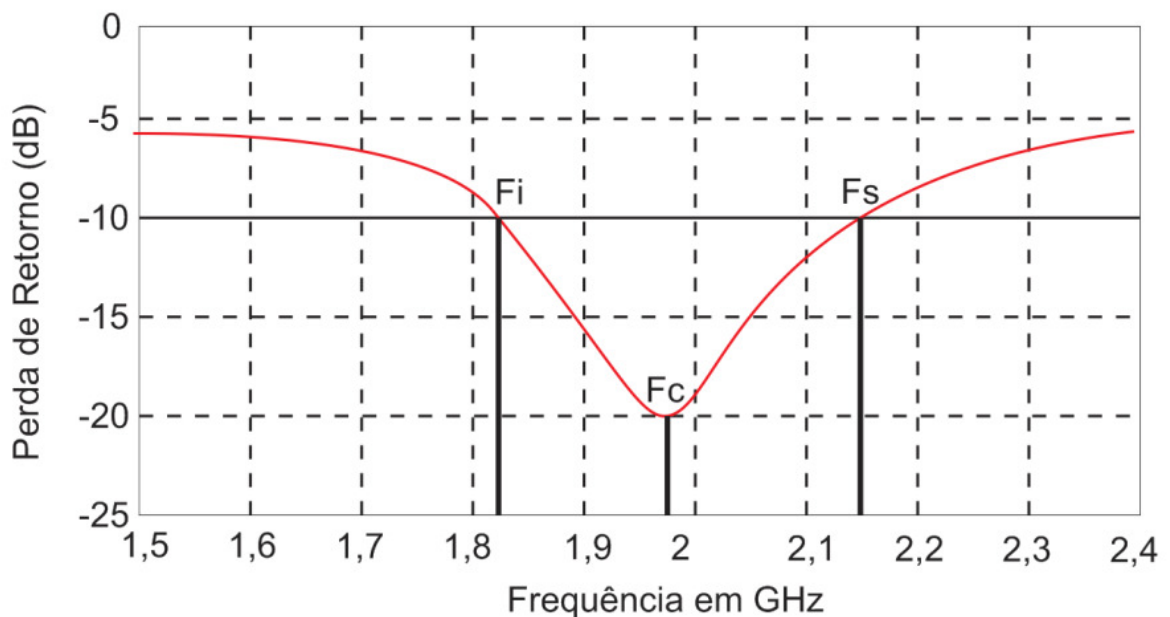


Figura 2.5 Gráfico de perda de retorno utilizado para definir a largura de banda

2.1.8 Perda de retorno

Para a definição da largura de banda, anteriormente descrito, é necessário conhecer a perda de retorno na faixa em que essa frequência irá operar, ou seja, a perda de retorno mostra a faixa de frequência onde os parâmetros de radiação não sofrem alterações. Sua escala é dada em decibéis (dB) e na maioria das situações, os autores utilizam o nível de 10 dB como limiar para a definição da largura de banda, onde este nível representa 90% da potência transmitida e 10% refletida. O projeto de antenas é fundamental conhecer a frequência desejada, e a partir disso, a perda de retorno fornecerá a largura de banda dessas frequências de ressonância almejadas. A figura 2.6 mostra uma tabela de conversão entre a perda de retorno e mais parâmetros de reflexão [22].

Return Loss - dB	SWR	GAMMA	Reflection Loss - dB	Through Power - %	Reflected Power - %	Return Loss - dB	SWR	GAMMA	Reflection Loss - dB	Through Power - %	Reflected Power - %
1	17.39	0.891	6.868	0.206	0.794	21	1.20	0.089	0.035	0.992	0.008
2	8.72	0.794	4.329	0.369	0.631	22	1.17	0.079	0.027	0.994	0.006
3	5.85	0.708	3.021	0.499	0.501	23	1.15	0.071	0.022	0.995	0.005
4	4.42	0.631	2.205	0.602	0.398	24	1.13	0.063	0.017	0.996	0.004
5	3.57	0.562	1.651	0.684	0.316	25	1.12	0.056	0.014	0.997	0.003
6	3.01	0.501	1.256	0.749	0.251	26	1.11	0.050	0.011	0.997	0.003
7	2.61	0.447	0.967	0.800	0.200	27	1.09	0.045	0.009	0.998	0.002
8	2.32	0.398	0.749	0.842	0.158	28	1.08	0.040	0.007	0.998	0.002
9	2.10	0.355	0.584	0.874	0.126	29	1.07	0.035	0.005	0.999	0.001
10	1.92	0.316	0.458	0.900	0.100	30	1.07	0.032	0.004	0.999	0.001
11	1.78	0.282	0.359	0.921	0.079	31	1.06	0.028	0.003	0.999	0.001
12	1.67	0.251	0.283	0.937	0.063	32	1.05	0.025	0.003	0.999	0.001
13	1.58	0.224	0.223	0.950	0.050	33	1.05	0.022	0.002	0.999	0.001
14	1.50	0.200	0.176	0.960	0.040	34	1.04	0.020	0.002	1.000	0.000
15	1.43	0.178	0.140	0.968	0.032	35	1.04	0.018	0.001	1.000	0.000
16	1.38	0.158	0.110	0.975	0.025	36	1.03	0.016	0.001	1.000	0.000
17	1.33	0.141	0.088	0.980	0.020	37	1.03	0.014	0.001	1.000	0.000
18	1.29	0.126	0.069	0.984	0.016	38	1.03	0.013	0.001	1.000	0.000
19	1.25	0.112	0.055	0.987	0.013	39	1.02	0.011	0.001	1.000	0.000
20	1.22	0.100	0.044	0.990	0.010	40	1.02	0.010	0.000	1.000	0.000

Figura 2.6 Tabela de conversão entre perda de retorno, SWR, GAMMA, Potência Transmitida e Potência Refletida.

2.1.9 Coeficiente de Reflexão

O coeficiente de reflexão, definido em [23], é dado pela razão da onda de tensão refletida pela onda de tensão incidente. Obtemos por:

$$\Gamma_c = \frac{V_0^- e^{\gamma l}}{V_0^+ e^{-\gamma l}} \quad 2.10$$

sendo: $V_0^- e^{\gamma l}$ - onda de tensão refletida;

$V_0^+ e^{\gamma l}$ - onda de tensão incidente;

γ - constante de propagação.

O coeficiente de reflexão na carga também pode ser obtido por:

$$\Gamma_c = \frac{Z_c - Z_0}{Z_c + Z_0} \quad 2.11$$

sendo: Z_0 - impedância característica da linha em (ohms)

Z_c - impedância na carga em (ohms)

2.1.10 VSWR (Voltage standing wave ratio) ou ROE (Relação de onda estacionária)

A relação de onda estacionária (ROE), ou como é de mais frequência encontrar na literatura como VSWR (*Voltage standing wave ratio*), é definida como a razão entre a tensão máxima sobre a mínima em uma linha de transmissão. Essa razão, descrita em [23], é dada por:

$$VSWR = \frac{V_{max}}{V_{min}} = \frac{I_{max}}{I_{min}} = \frac{1+\Gamma}{1-\Gamma} \quad 2.12$$

Sendo: V_{max} - tensão máxima;

V_{min} - tensão mínima;

I_{max} - corrente máxima;

I_{min} - corrente mínima;

Γ - coeficiente de reflexão.

Em estudo de antenas, a ROE é sempre um numero real e positivo, sendo melhor quanto menor for essa taxa. Uma taxa pequena de ROE significa maior potência entregue da linha de transmissão para a antena, tendo o valor de 1,0 como referencia para 100% da potência entregue e nenhuma refletida, que é o caso ideal.

2.2 Antenas Filamentares

Antenas apresentam uma imensa variedade de formas e tipos, porém há tipos de antenas mais comuns de encontrar no cotidiano, como no caso das antenas filamentosas. Este tipo de antenas é mais familiar, podendo ser encontradas em todos os lugares. Isso é devido sua grande versatilidade e simplicidade na sua construção. São os tipos de antenas mais antigas encontradas. Projetos das mais variadas formas foram estudados para a confecção de antenas filamentosas, sejam dipolos, monopolos, antenas de quadro (loop), espirais,

helicoidais e etc. Dois tipos são fundamentais para o entendimento dos projetos de antenas, pois já foram muito bem investigadas e dispõem de muito material na literatura, que são: dipolo de meio comprimento de onda e o monopolo de um quarto de onda.

2.2.1 Dipolo de meio comprimento de onda

Podemos considerar (afirmar) esse tipo de dipolo como o mais comum e utilizado, sendo assim chamado devido seu comprimento ser determinado pela metade do comprimento de onda da frequência de operação, ou seja, seu comprimento $l = \lambda/2$, onde λ é o comprimento de onda. Sua impedância de entrada é conhecida e vale aproximadamente $Z_{in} = 73 + j42,5$, onde é composta pela soma destas duas parcelas em que a primeira contém a parte real (resistência) e a outra a parte imaginária (reatância) da impedância de entrada. A figura 2.7 ilustra um dipolo de meio comprimento de onda.

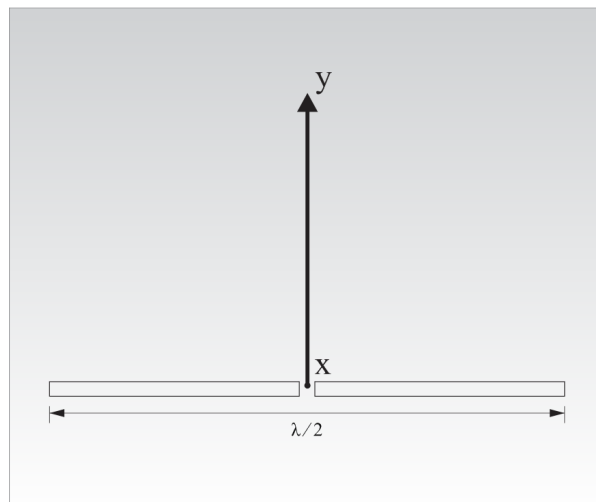


Figura 2.7 Dipolo de meio comprimento de onda

As componentes de campo elétrico e magnético podem ser matematicamente definidas, segundo [20], com as seguintes expressões:

$$E_{\theta} \simeq j\eta \frac{I_0 e^{-jkr}}{2\pi r} \left[\frac{\cos\left(\frac{\pi}{2} \cos\theta\right)}{\sin\theta} \right] \quad 2.13$$

$$H_{\phi} \simeq j \frac{I_0 e^{-jkr}}{2\pi r} \left[\frac{\cos\left(\frac{\pi}{2} \cos\theta\right)}{\sin\theta} \right] \quad 2.14$$

Podemos observar na figura 2.8 a distribuição de corrente ao longo do comprimento do dipolo referido. A distribuição é senoidal, sendo que em suas extremidades não apresentam corrente, ou seja, são nulos, e sua corrente estacionária máxima I_0 é igual a corrente de entrada I_{in} .

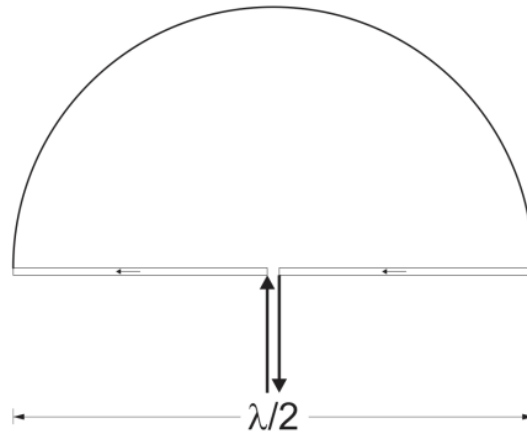


Figura 2.8 Distribuição de corrente ao longo do comprimento do Dipolo de meio comprimento de onda

É possível analisar essa afirmação com o resultado de uma simulação de um monopolo no software CST, onde é possível ver na escala de cores, que a distribuição de corrente vai decaindo em função do comprimento do monopolo, chegando até a extremidade, onde é nula a corrente, conforme observamos na figura 2.9.

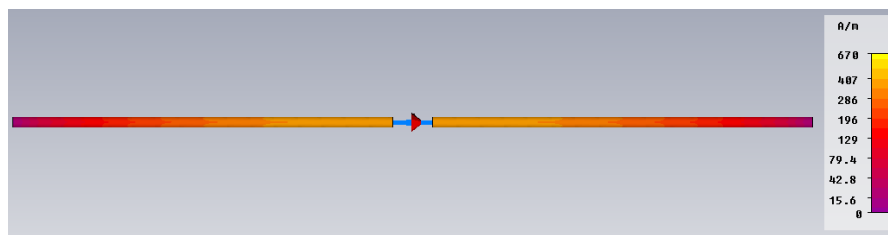


Figura 2.9 Simulação da distribuição de um monopolo de meio comprimento no CST.

Outra particularidade importante desse tipo de monopolo é seu diagrama de radiação, mostrado na figura 2.10. Observamos que na direção ao longo do monopolo tem um diagrama não direcional, no plano azimutal $[f(\phi), \theta = \pi/2]$, já no plano ortogonal a antena, plano de elevação $[g(\theta), \phi = constante]$, temos um diagrama direcional. Esse tipo de diagrama é denominado de omnidirecional.

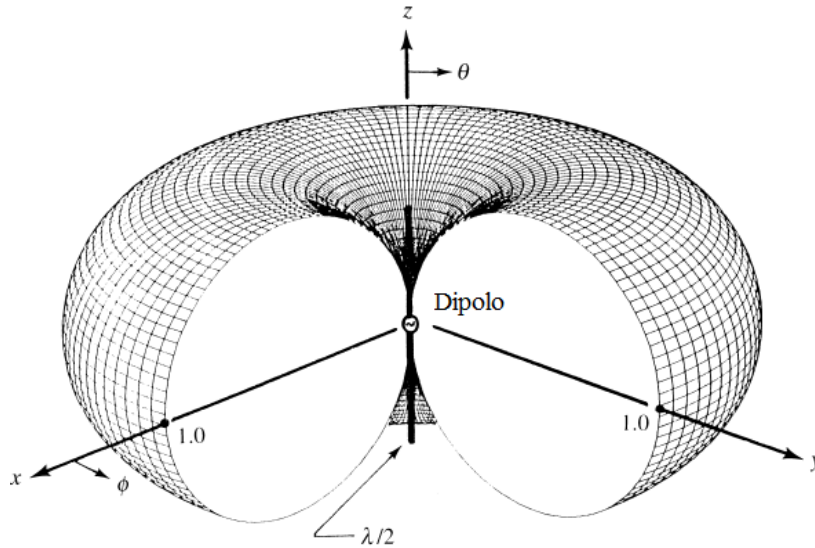


Figura. 2.10 Diagrama tridimensional do dipolo de meio comprimento de onda [20]

2.2.2 Monopolo de um quarto de comprimento de onda

Podemos verificar a distribuição de um monopolo de um quarto do comprimento de onda através da figura 2.11, que ele possui um comportamento análogo. A corrente mostra sua concentração máxima no ponto onde fica o terminal e decai ao longo do monopolo chegando a se anular na outra extremidade.

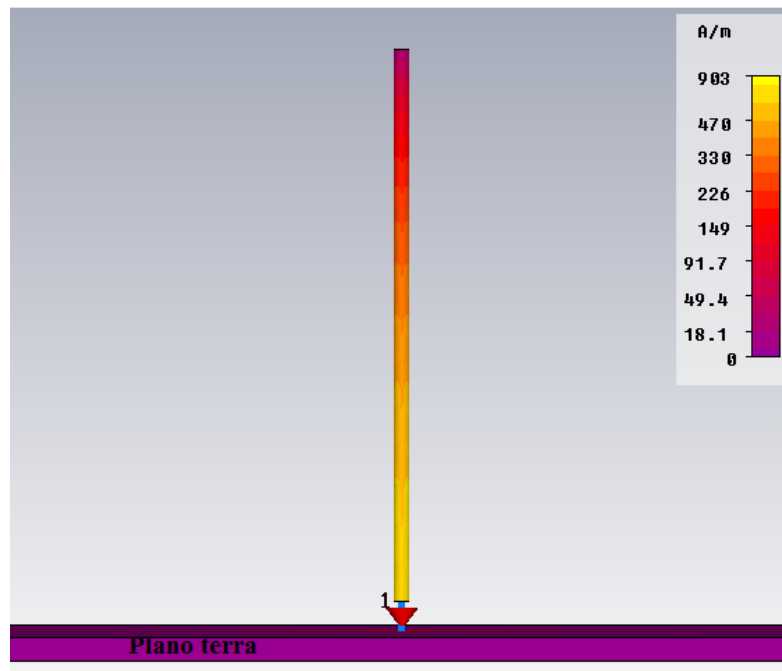


Figura 2.11 Distribuição de corrente em uma antena monopolo $\lambda/4$ sobre um plano terra infinito

A impedância de entrada de um monopolo de $\lambda/4$ é igual à metade da impedância de entrada do dipolo isolado de $\lambda/2$ [20]. A Figura 2.12 apresenta a antena monopolo de $\lambda/4$ sobre um plano terra infinito.

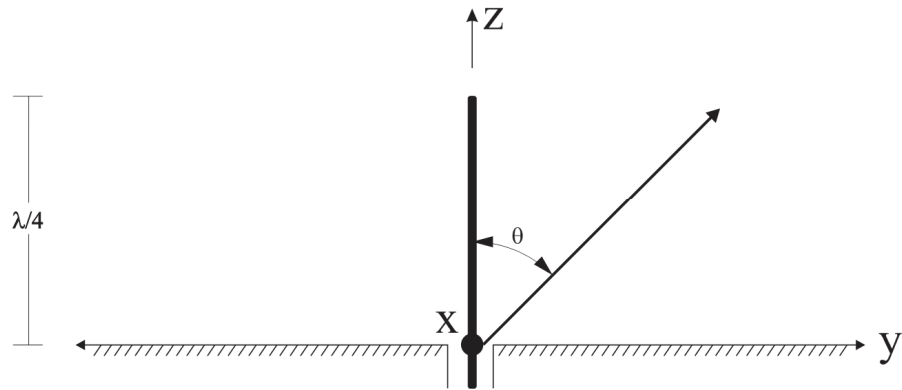


Figura 2.12 Monopolo de $\lambda/4$ sobre um plano terra infinito

Assim como a impedância de entrada, o diagrama nos apresenta a metade de um diagrama de radiação de um dipolo de meio comprimento de onda, conforme observamos na imagem da figura 2.13.

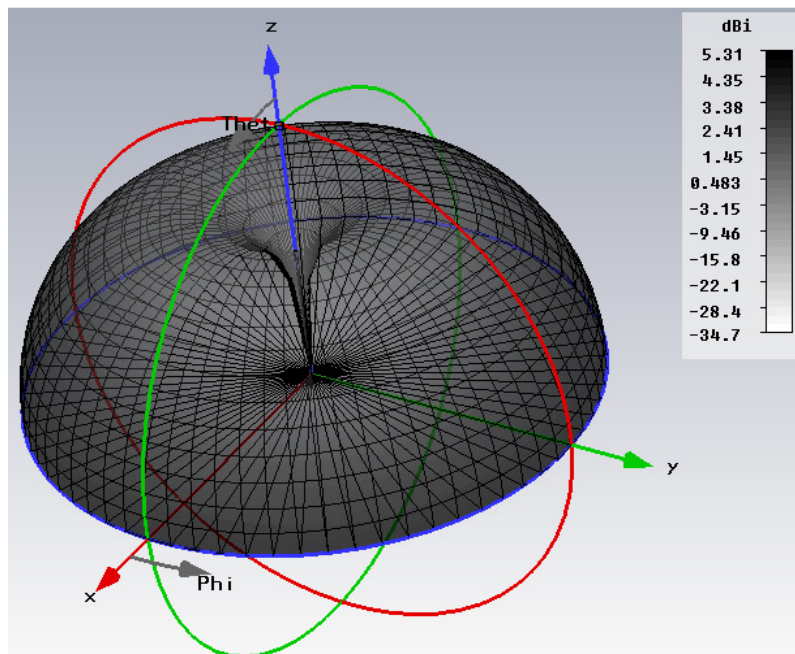


Figura 2.13 Diagrama de radiação do monopolo de $\lambda/4$ sobre um plano terra infinito [9].

2.3 Antenas de microfita

As antenas de microfita começaram a ser desenvolvidas na década de 50, porém ganharam destaque a partir da década de 70, onde começaram a ser bem mais empregadas [24]. Suas aplicações são variadas e muito atrativas devido seu baixo custo, fácil instalação e baixo peso. Este tipo de perfil que elas apresentam permite a adequação e aplicação em dispositivos de comunicações sem fio, como celulares, tablets e outros mais modernos.

Uma antena de microfita basicamente é consistida da seguinte forma: duas placas metálicas condutoras, paralelas, sendo uma delas sendo o elemento condutor irradiante (ou patch, comumente chamado) e a outra placa sendo o plano terra, são separadas por um material substrato dielétrico. O *patch* metálico possui uma espessura pequena ($t \ll \lambda$), afastado do plano terra por uma distância na ordem de uma pequena fração do comprimento de onda ($h \ll \lambda$), sendo eles separados pelo substrato dielétrico de permissividade ϵ_0 e espessura h . Podemos observar na figura 2.14 um exemplo de uma microfita, onde visualizamos sua disposição descrita acima.

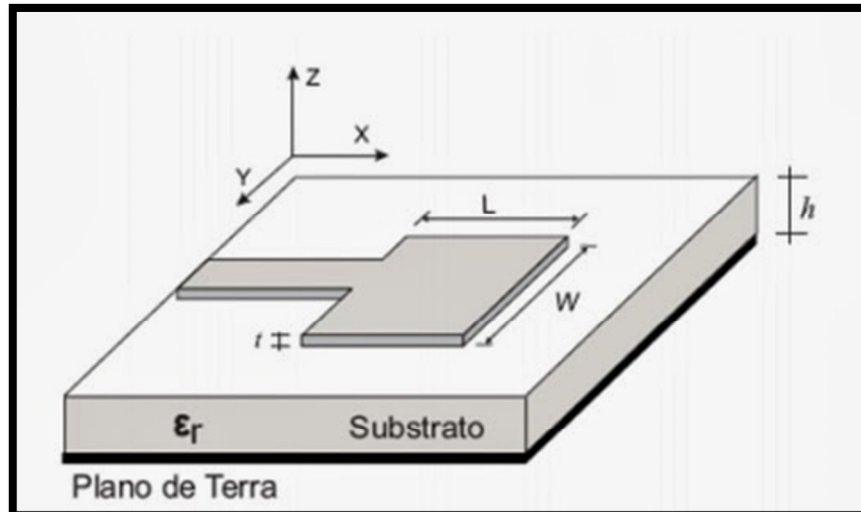


Figura 2.14 Antena de Microfita

Os elementos de microfita e suas linhas de alimentação são impressos na mesma face do material substrato, sendo que o *patch* pode assumir, a priori, qualquer forma geométrica, sendo que diversas formas já foram bem exploradas, sendo o uso de geometrias fractais novas opções para projetos de antenas impressas.

Para aprimorar o desempenho de uma antena impressa podemos conseguir com a utilização de um substrato com uma baixa constante dielétrica, proporcionando melhor eficiência e largura de banda. Porém deve se atentar que isso influencia no tamanho da antena.

2.4 Considerações Finais

Apresentamos neste capítulo uma revisão de conceitos teóricos fundamentais no desenvolvimento dessa dissertação. O projeto proposto neste trabalho foi guiado e regido por esses preceitos. O capítulo a seguir nos apresentará um estudo de antenas fractais, suas recentes aplicações e também irá roteirizar o detalhamento dos passos utilizados no desenvolvimento do projeto final.

CAPÍTULO 3

ANTENAS FRACTAIS

O presente cenário das comunicações eletrônicas ao redor do mundo, onde a predominância em quase sua totalidade é digital, influencia no comportamento e modos de convivência da sociedade. Sendo evidente que todo esse avanço foi resultado de uma visão precursora de pesquisadores que compreendiam na convergência de diversas tecnologias agrupadas em únicos dispositivos. Esta perspectiva impulsionou e ainda impulsiona a área de pesquisa de novos irradiadores que atendam essa necessidade crescente de serem versáteis em diversas frequências (multibanda ou de banda larga) e de serem compactos e portáteis. Assim como o tamanho dos circuitos evoluiu para transceptores que cabem em um único chip, há também uma necessidade de desenvolver nos modelos de antenas para que acompanhe essa miniaturização de dispositivos, porém sempre seguindo certos limites físicos (tamanho da antena em relação ao seu comprimento de onda), para que no fim não haja uma queda na resistência de radiação, com isso aumentando o armazenamento de energia reativa e prejudicando a eficiência de radiação da antena [25]. Dentre diversas alternativas que foram desenvolvidas para manipular as frequências pretendidas e na miniaturização de antenas, uma solução que se mostra válida e interessante é a implementação das antenas fractais, que consistem em combinar geometrias fractais com teoria de antenas para a confecção delas, resultando-nos em antenas e arranjos nas mais diversas formas.

Neste capítulo, forneceremos um conteúdo necessário, para a compreensão da aplicação de geometrias fractais através de uma compilação dos conceitos básicos juntamente com exemplos de recentes desenvolvimentos de pesquisas que combinam geometria fractal com teoria eletromagnética, em especial, na aplicação em engenharia de antenas. A descrição de algumas das geometrias fractais mais significantes, que são utilizadas em processos de confecção desse tipo de antenas, também serão mencionadas aqui.

3.1 Geometria Fractal

A imensa diversidade de formas que a natureza nos presenteia é de uma beleza fascinante. A extensa variedade de objetos com superfícies que exibem uma complexidade notável despertou o interesse de estudiosos em como descrever matematicamente estes tipos de estruturas, afinal, seria possível visualizar um comportamento padrão na formação dessas estruturas sendo elas frutos de eventos totalmente aleatórios e aparentemente caóticos? Vendo

que essa primeira impressão era muito superficial, o desafio era encontrar certa ordem dentro do caos, assim nos permitindo compreender a formação de superfícies complexas e extremamente irregulares que se encontram na natureza e traduzi-las em equações matemáticas simples.

Esse desafio não era possível de ser realizado com o suporte da geometria euclidiana até então, afinal, era evidente que a maioria dos fenômenos naturais não possuía formas exatas. O formato de uma montanha não é de um cone, assim como uma nuvem não é uma esfera ou um raio não descreve uma trajetória de uma linha reta. Foi então que o matemático polonês Benoit B. Mandelbrot, com a publicação do seu livro [13] em 1982, sendo que estudos já foram iniciados desde a década de 70, respondeu a este desafio, criando uma nova forma de geometria que descreveriam em meio a uma irregularidade altamente complexa na natureza, ou seja, é perfeitamente possível encontrar uma regularidade impressionante e extremamente rígida. Ele chamou essas formas de Fractal, (do latim *Fractus*, fração, quebrado, irregular). Essas ramificações da matemática não só limitaram-se a descrever fenômenos naturais, como a forma das nuvens, flocos de neves ou as ramificações de bacias hidrográficas, ele é de vasta aplicação e foi associado aos mais variados ramos de estudos, como biologia (ex.: a formação de vasos sanguíneos, tecidos cerebrais ou as ramificações dos brônquios), economia (ex.: comportamento da bolsa de valores no mercado financeiro), etc. Diversos sistemas aparentemente caóticos mostram propriedades semelhantes.

Podemos entender melhor um Fractal com a definição de Mandelbrot dada em [13]: “Um fractal é uma forma feita de partes semelhantes ao seu todo de alguma forma.”, simplificando esta definição, fractal é um objeto que apresenta uma auto-similaridade sob diferentes graus de ampliação, onde cada pequena parte deste objeto é uma réplica da estrutura como um todo, ou seja, são formas cujos componentes são semelhantes à totalidade de estrutura. Componentes estes, por sua vez, formados por subcomponentes também semelhantes ao todo, tendo esta auto-similaridade se estendendo por vários níveis. Fractais são formas geométricas geradas recursivamente, que podem resultar em figuras de beleza impressionante com padrões complexos que se repetem infinitamente, mesmo se limitados a uma área finita.

Por fim, podemos compreender como um fractal qualquer estrutura onde as suas ramificações sejam variações de uma mesma forma básica, sendo essa estrutura fruto das repetições desse padrão anteriormente definido, resultando em estruturas complexas belas em que através de uma lente de aumento, observamos que estas diferentes partes se mostram

invariantes à forma da figura como um todo. Um exemplo em que conseguimos visualizar como procedimentos recursivos simples podem resultar em figuras complexas e de beleza estética impressionante é o Conjunto de Mandelbrot, onde o que é necessário para compor as imagens resume-se a uma formula iterativa no plano dos números complexos $z = x + iy$:

$$z_{n+1} = z_n + c \quad 3.1$$

Sendo $c = a + ib$, uma constante complexa e $n = 0,1,2,3, \dots$. Considera-se um certo valor inicial (semente) z_0 . O conjunto de Mandelbrot são os valores de c tais que, para um $z_0 = 0$, a iteração não diverge, ou seja, os valores de cada passo, z , não são arbitrariamente grandes [26]. O resultado das iterações da formula, para vários valores da constante c é ilustrado na figura 3.1, onde a parte visível seria onde a norma não tende para o infinito, mesmo após um numero alto de iterações.

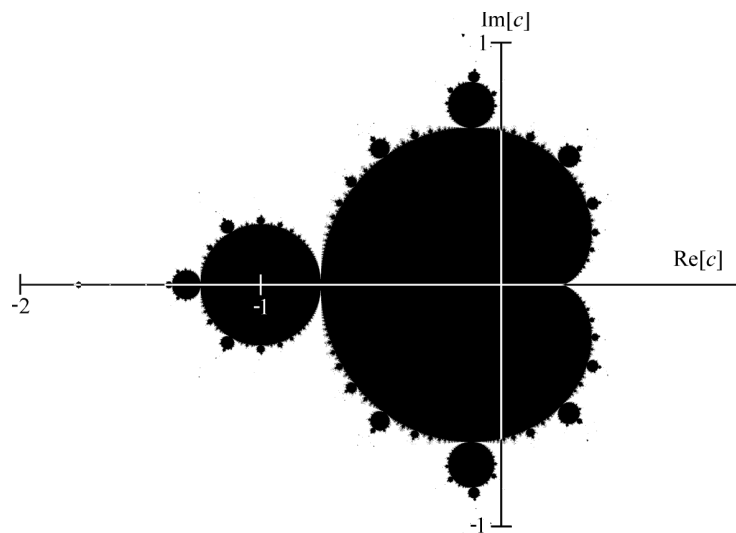


Figura 3.1 Conjunto de Mandelbrot

Podemos citar algumas características presentes na maioria dos fractais [27]:

1. Fractais têm detalhes sobre partes arbitrárias dele mesmo em pequenas escalas.
2. São geralmente definidas por processos recursivos simples.
3. São considerados demasiadamente irregulares para serem descritos na linguagem geométrica euclidiana tradicional
4. Fractais tem algum tipo de auto-similaridade entre eles.
5. Fractais têm dimensão fractal.

Podemos dividir os fractais em duas classes quanto ao seu processo de criação: determinísticos, os que são obtidos a partir da iteração de uma teoria matemática (como o método de sistema de funções iteradas, onde possui uma regra fixa de substituição geométrica) e não determinísticos (aleatórios ou estocásticos), onde as formas são obtidas através da repetição de um modelo aleatório [13][27].

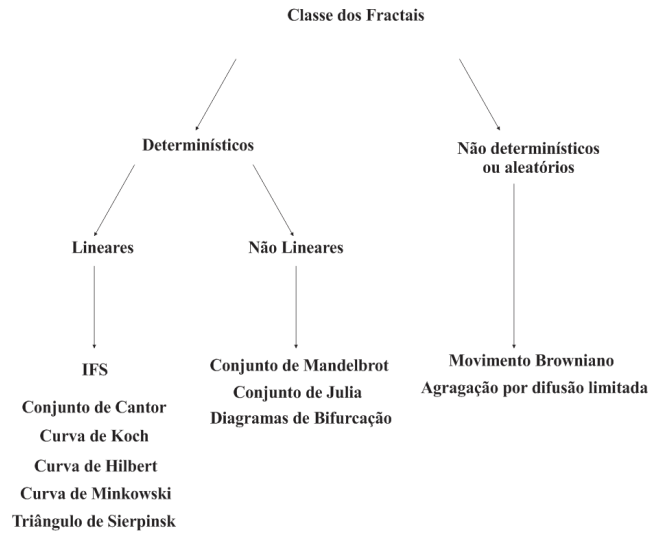


Figura 3.2 Classe dos Fractais

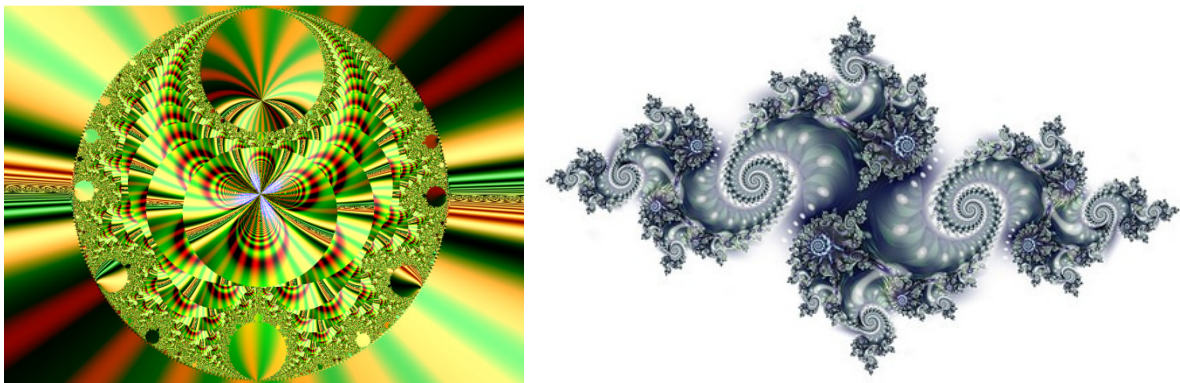


Figura 3.3 Exemplos de Fractais não lineares (Obtidos com o conjunto de Mandelbrot e de Julia, respectivamente)

A proposta de Mandelbrot atendeu a uma necessidade de resolver o problema de como descrever a natureza com formas geométricas, porém com a geometria Euclidiana era impossível. Ele propôs que a geometria fractal pudesse descrever objetos reais, como as ramificações das árvores, meandro das águas dos rios, os limites das nuvens, as erosões aleatórias que descrever as formas das montanhas e muitos outros. E as possibilidades de aplicação são diversas, por exemplo: no corpo humano os pulmões são formados por divisões

de linhas, cópias delas mesmas; assim como na superfície do nosso cérebro o grande número das dobras podem ser modelados por fractais; a estrutura do universo, os aglomerados de galáxias e sistemas estelares, cada detalhe do universo mostram semelhantes padrões de agrupamento; durante transmissões eletrônicas foi possível observar um padrão na proporção de dados livres de erro pelo ruído se mantinham constantes em qualquer escala de ampliação, foi onde Mandelbrot utilizou o fractal conhecido como “Poeira de Cantor” que descrevia perfeitamente a estrutura dos lotes de erros nas linhas de transmissão de computadores. E assim por diante, ficou claro que é possível visualizar diversos exemplos na natureza que provam a existência dos fractais, sendo eles necessários para descrever situações mais complexas que a geometria clássica não atende.

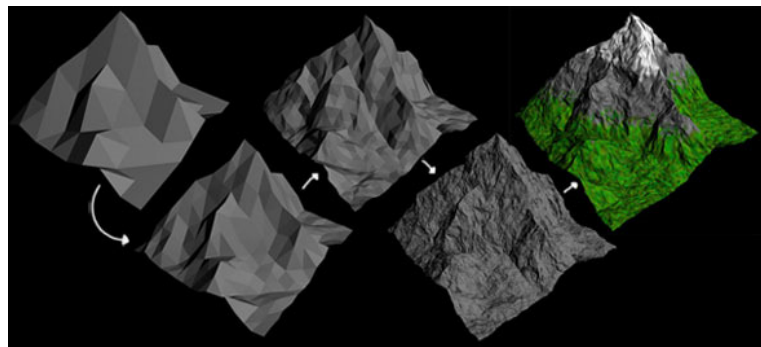
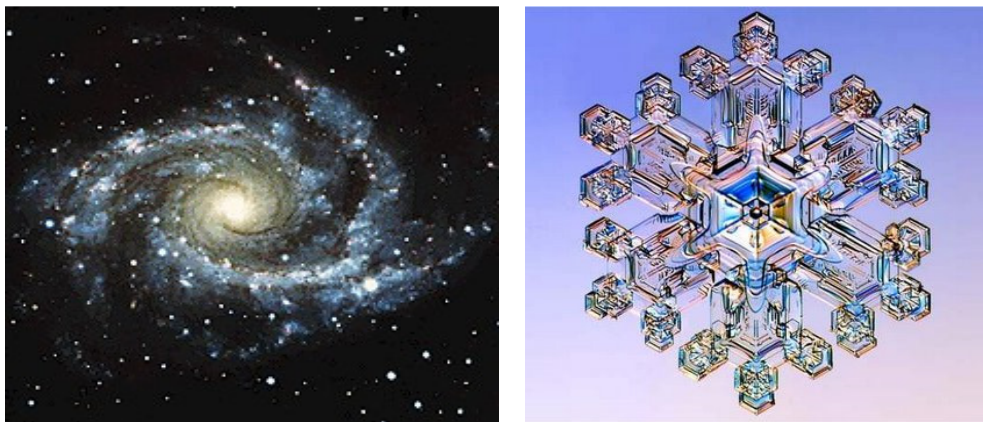


Figura 3.4 Exemplos de Fractais encontrados na natureza.

3.2 Fractal e Antenas

A partir da premissa de compreendermos as características da geometria fractal, é importante analisarmos os benefícios obtidos na aplicação dessas geometrias no campo de estudo de antenas. Outro fator relevante e atrativo dos fractais é a capacidade de preenchimento de espaço que algumas delas apresentam. As formas complexas que as antenas podem obter com a aplicação das curvas fractais são atrativas, pois resultam em antenas diferenciadas com respostas eletromagnéticas diferentes das antenas com as formas sem o fractal.

A capacidade de preenchimento de espaço pode resultar em antenas com formas complexas e diferentes em um espaço físico compacto. As resposta em frequência desse tipo de mudança na forma das antenas permitem a miniaturização das mesmas e também em uma otimização na largura de banda. Há diversos trabalhos muito interessantes que confirmam esses benefícios que as curvas fractais trazem na eletrodinâmica das antenas, sendo o uso desse tipo de geometria combinada com a teoria de antenas bastante emergente e tem rendido bons frutos, é possível observar que sua aplicação implica em melhoras significativas no desempenho das antenas.

O trabalho de Nathan Cohen [15] é a primeira publicação científica que se tem conhecimento que apresenta uma antena fractal. Uma serie de artigos mostravam a aplicação de curvas fractais em dipolos ou antenas loop, onde foi visto que após cada iteração é possível manter o comprimento da antena, porem reduzindo a dimensão total da antena, e mantendo o comportamento da resposta em frequência da antena. Sendo assim é perfeitamente possível a miniaturização dessa antena sem perder as propriedades eletromagnéticas do irradiador e aplica-los na mesma frequência que foi inicialmente projetada.

Podemos observar essa mesma conclusão em [17] e [28] onde o autor utiliza da Curva de Minkowski e da Curva de Koch para a obtenção de uma nova antena patch de microfita, que implicou em uma redução da frequência de ressonância anteriormente projetada, podendo realizar uma miniaturização desse patch para reutilizar a frequência pretendida. Esse e diversos outros trabalhos nos permitiram concluir que apesar da antena fractal sendo menor do que a euclidiana inicialmente projetada exibe um mesmo ou maior ganho, frequências de ressonância e uma impedância de entrada de 50 ohms.

Em geral, as chamadas antenas fractais são descritas como a aplicação de conceitos matemáticos na definição das formas das antenas, que assim permitiu o surgimento de uma

nova geração de antenas com algumas características que por muito tempo foram consideradas impossíveis de se obter nos meados da década de 80 [27].

Em comparação a antenas convencionais, as antenas fractais tem maior largura de banda em tamanhos compactos, podendo também alcançar frequências ressonantes multibandas com as repetições dos padrões, e largas de bandas bem extensas [29][30].

De certa forma, com as informações descritas até então, podemos resumir os benefícios das antenas fractais na seguinte maneira:

1. A Auto-similaridade das curvas é útil para projetar antenas multibanda e tem sido aplicado na concepção de arranjos multibanda, como vistos nos exemplos [16], [31] a [35];
2. Antenas de banda larga ou banda ultralarga (UWB), como vistos em [18]. [36] a [40];
3. Técnicas de miniaturização, estudadas, por exemplo, em [17], [28], [41] e [42];
4. Úteis na obtenção de alta diretividade e de baixos lóbulos laterais nos diagramas de irradiação;
5. Nós podemos obter um bom casamento de impedância de entrada;
6. Podem operar em altas frequências.

Em contrapartida, o uso de fractais em antenas possuem suas desvantagens, das quais podemos citar:

1. Perda no ganho da antena.
2. Tem limitação numérica, ou seja, o numero de iterações fica inviável a partir de 4 ou 5, pois os tamanhos pequenos dos detalhes, além de impossíveis de se fabricar, são irrelevantes na resposta em frequência com o aumento das iterações.
3. Alta complexidade na forma das antenas, sendo inviável a confecção, em alguns casos.
4. Depois de mais algumas iterações, degrada-se os parâmetros de antena.

É possível observarmos que fractais são formas complexas que não podem ser medidas apenas por dimensão topológica. Diante dessa necessidade de descrever esses objetos com formas complexas, a chamada dimensão fractal é um tipo de formulação que surge então como uma alternativa de medição já que pode assumir valores fracionários, obtendo assim o

grau de complexidade de uma forma, diferente, por exemplo, do espaço euclidiano, onde os valores de dimensão variam de 0 a 3, assumindo apenas números inteiros [43].

A possibilidade de possuir uma dimensão fracionária é exclusiva dos fractais. Pode-se afirmar que a dimensão fractal de um conjunto é um valor que diz o quão densamente um conjunto ocupa o espaço métrico em que ele existe. Dentre diversas formas de definir a dimensão de um fractal a mais utilizada dada pela equação de Hausdorff-Besicovitch:

$$D = \frac{\log N}{\log r} \quad 3.2$$

Onde N representa o número de segmentos que a geometria possui e r é o número que cada segmento é dividido após cada iteração.

3.3 Método Sistema Iterativo de Funções (IFS) na geração de fractais

O sistema iterativo de funções (IFS) é um método bem conveniente, versátil e efetivo na obtenção de uma grande variedade de fractais. Baseia-se na aplicação de cópias de si mesmo, cada uma dessas cópias em escala menor a cada iteração [27][29]. Estes sistemas de funções iterados baseiam-se na aplicação de uma série de transformações afins, W , para uma forma elementar em varias iterações. O método IFS é baseado em transformações matemáticas (contração, reflexão, rotação e translação). Definimos então:

$$W \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} e \\ f \end{pmatrix} \quad 3.3$$

Onde $a, b, c, d, e, e f$ são números reais. Assim, a transformação afim, W , é representada por seis parâmetros, em que a, b, c, d e controle de rotação e dimensionamento, enquanto e e f controle linear de translação, sendo mais bem observado no exemplo da figura 3.5.

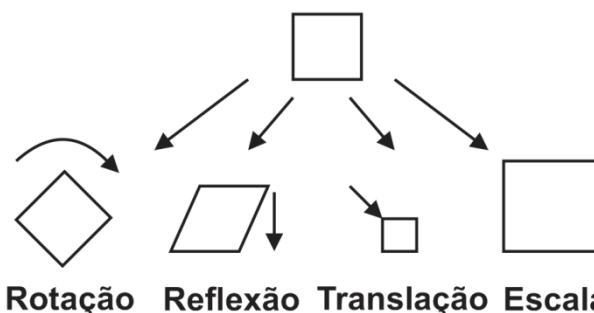


Figura 3.5 Transformações afins de um quadrado.

3.4 Curvas fractais

Muitos padrões na natureza são tão irregulares e fragmentados que exibem não só um grau mais elevado, mas também um maior grau de complexidade. Assim, Mandelbrot propôs uma nova geometria e a sua utilização em vários campos diferentes. A geometria descreve muitos dos padrões irregulares e fragmentados da natureza que nos rodeia. Ele usou o termo fractal para descrever alguns objetos complexos e complicados, como montanhas, costas e muitos outros fenômenos naturais. A seguir vamos apresentar geometrias que são amplamente utilizadas em diversas aplicações, e muito utilizadas na área de engenharia de antenas.

3.4.1 Curva de Koch

Em 1998, o monopolo de Von Koch foi a primeira antena fractal relatado que apresentou melhorias nas características de algumas antenas em termos de frequência de ressonância, resistência à radiação e largura de banda. A construção da curva do fractal de Koch é obtida através da substituição de uma forma geométrica triangular em um seguimento de reto anteriormente dividido em três partes, onde o seguimento do meio é substituído pelo triângulo equilátero sem a base, obtendo-se assim um polígono, sendo os passos seguintes, a substituição dessa nova curva em todos os novos segmentos obtidos a cada iteração. Cada iteração adiciona comprimento para a curva total que resulta em um comprimento total que é de $4/3$ a geometria original. A seguir uma ilustração da curva de Koch.

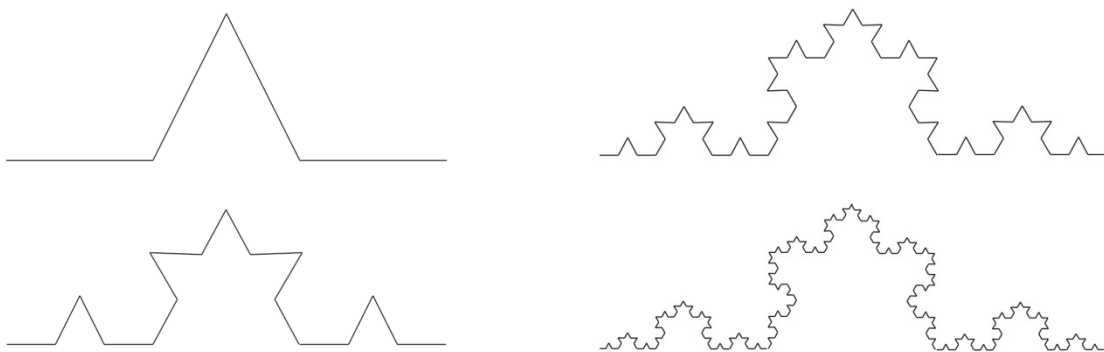


Figura 3.6 Estágios da Curva de Von Koch.

3.4.2 Curva de Minkowski

A curva de Minkowski foi datado em 1907, onde um matemático alemão, Hermann Minkowski, na investigação das formas quadráticas e frações contínuas. O quadro de Minkowski, mostrado na figura 3.7, pode ser usado para miniaturizar o tamanho da antena, aumentando a eficiência com a qual preenche o seu volume, assim aumentando o comprimento elétrico da antena. Um fractal Minkowski é analisado, em que o perímetro está perto de um comprimento de onda. A comparação de várias iterações com uma antena de quadro quadrado é feito para ilustrar as vantagens de usar uma antena fractal.

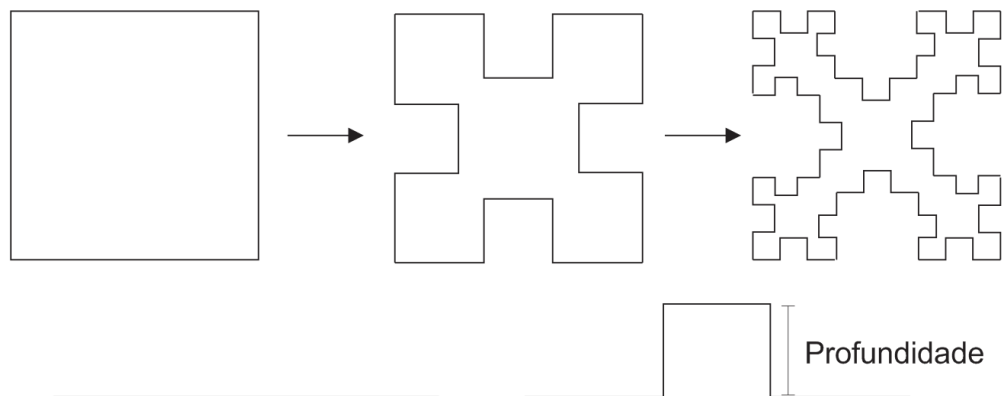


Figura 3.7 Curva de Minkowski aplicado em um quadro.

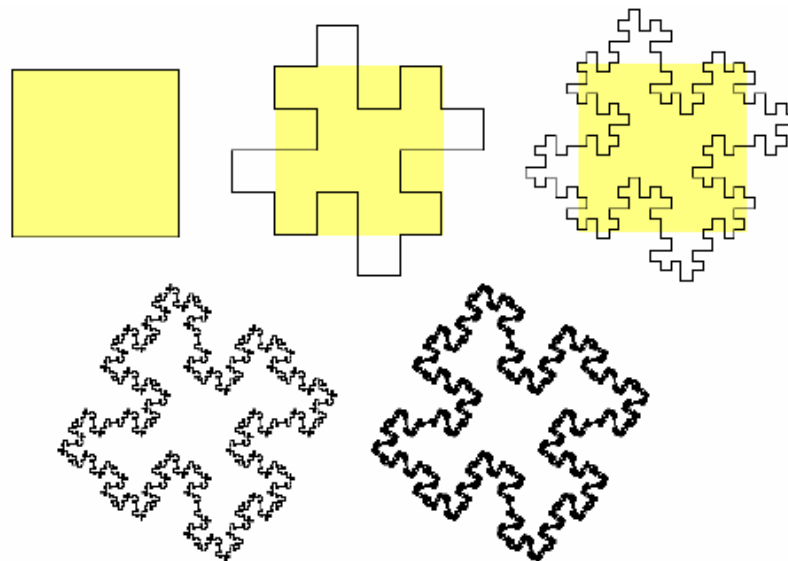


Figura 3.8 Estágios do processo de geração da Ilha de Minkowski

3.4.3 Curva de Hilbert

As primeiras iterações de curvas de Hilbert são mostradas na Figura 3.9. Pode ser notado que cada uma das sucessivas etapas consiste de quatro cópias do anterior, juntamente com os segmentos de linha adicionais. A geometria obtida é uma curva de preenchimento de espaço, que é com o grande número de iterações toda a área que ocupa serão preenchidos. Em conjunto a isso, essa curva também tem as seguintes propriedades: a auto-anulação (como os segmentos de linha não se cruzam entre si), Simplicidade (uma vez que a curva pode ser desenhado com um único golpe de uma caneta) e auto-similaridade.

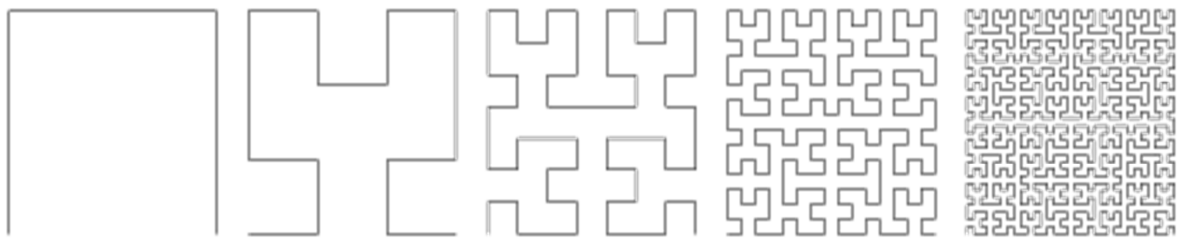


Figura 3.9 Estágios de geração de iterações da curva de Hilbert

3.4.4 O Triângulo de *Sierpinski*

O triângulo de Sierpinski, também conhecido com tapete de Sierpinski, é obtido na realização de sucessivas iterações em um patch triangular simples, ou quadrado no caso do tapete de Sierpinski, que é chamado como a iteração ordem zero. O triângulo de dimensão igual a um terço do remendo principal é subtraído a partir do centro para obter a primeira iteração. Este processo é repetido continuamente mais para obter iterações. O padrão é definido de tal modo que cada forma gravada no polígono original é de um terço em dimensão, em comparação com o anterior, partilhando a mesma regra de escolha do ponto central.

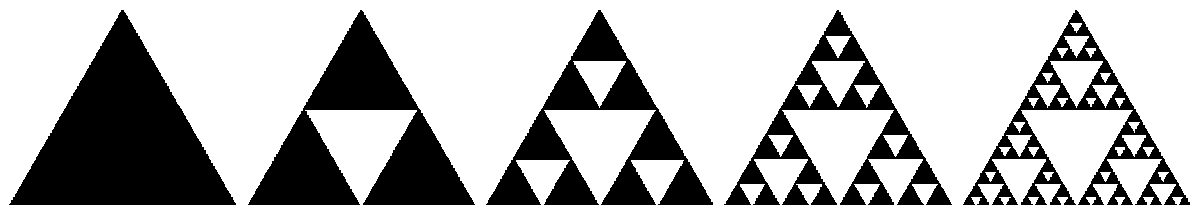


Figura 3.10 Estágios de geração de iterações do triângulo de Sierpinski.

3.5 Considerações Finais

Neste capítulo foram apresentados os aspectos teóricos e fundamentos essenciais para a compreensão das geometrias fractais, um ramo da matemática de conhecimento promissor e inovador, que vem sendo explorada em diversas áreas da ciência, como na biologia, geologia, medicina, engenharia, etc. Pontuando um mérito especial ao que é pesquisado neste trabalho, vimos também sobre a aplicação de fractais na área de engenharia de antenas, um espaço relativamente novo.

Esse tipo de aplicação nos apresentou comportamentos interessantes, como por exemplo, a possibilidade da antena ser multibanda, sendo este comportamento obtido em antenas com detalhes oriundos de cópias de si mesma, sendo esta auto-similaridade uma característica fundamental nas geometrias fractais. Todo esse conceito é fundamental no desenvolvimento deste trabalho, com o fim de afirmar a eficiência da aplicação desse tipo de geometria para a otimização de antenas.

CAPÍTULO 4

PROJETO E SIMULAÇÃO DA ESTRUTURA PROPOSTA

A partir deste ponto, neste estudo propõe-se o projeto e a modelagem de uma estrutura que nos resulte em uma antena monopolo impressa que atenda às especificações da tecnologia de banda ultralarga (Ultra-Wideband Antennas - UWB), utilizando o embasamento teórico anteriormente apresentado nos primeiros capítulos. Uma breve descrição da metodologia utilizada na elaboração desse protótipo se detalha na seguinte forma: descreveremos a geometria de um monopolo compacto na forma de um hexágono; em seguida, com a finalidade de conseguir uma otimização na largura de banda através da redução dos níveis de perda de retorno abaixo de -10dB, aplicaremos uma curva fractal conhecida (curva de Peano) na bordas do monopolo hexagonal inicialmente escolhido; é investigado o comportamento da largura de banda; por fim, como última modelagem e análogo ao passo anterior, realizaremos modificações na estrutura do plano terra através da aplicação de uma curva fractal diferente da anteriormente utilizada (curva de Koch), e assim analisaremos novamente o efeito na largura de banda, adequando na faixa de frequência definida anteriormente. Nesse caso, os sistemas UWB previamente definem a faixa de frequência de operação: de 3,1 a 10,6 GHz . A escolha das seguintes curvas fractais veio após a análise de diversas curvas com características de preenchimento de espaço. Foi considerada uma relação de benefício e complexidade para a escolha dos fractais escolhidos, onde foi possível observar que a curva de Peano trás um benefício aceitável com pouca complexibilidade em comparativo a outras curvas. Da mesma forma, o uso da curva de Koch é de melhor viabilidade na construção e nos seus resultados em comparação com o fractal de Peano quando aplicado no plano terra.

Essa otimização dos níveis de perda de retorno são extremamente almejados em sistemas UWB, pois permitem uma maior tolerância para modificações devido a possíveis discrepâncias no processo de fabricação dessas antenas. A metodologia foi aplicada em ambiente computacional, através do software comercial CST STUDIO SUITE 2010 [44], que é uma ferramenta completa e eficiente para a realização de simulações de estruturas variadas que envolvam problemas eletromagnéticos. O *software* em questão tem ampla aceitação e utilização pela comunidade científica nos últimos anos, sendo visto frequentemente em publicações em periódicos e eventos.

Através da simulação no *software* supracitado, podemos modelar os parâmetros que compõem o problema proposto e coletar os resultados para uma análise precisa, permitindo o desenvolvimento deste.

A continuação do trabalho vem com a confecção do protótipo e realizaremos campanhas de medições nos equipamentos adequados, com o fim de validar as simulações e assim afirmar a contribuição do uso de geometrias fractais em engenharia de antenas. Todas as configurações e modelagens analisadas neste modelo foram alimentadas por uma linha de microfita (*microstrip-fed*) com impedância de 50Ω . A seguir, apresentamos os passos descritos anteriormente sobre a simulação do monopolo proposto, que vão desde a descrição geométrica do monopolo hexagonal inicial até o protótipo final, com a aplicação de curvas fractais em suas dimensões, assim exibindo os resultados dos parâmetros que são relevantes neste tipo de análise, como perda de retorno e largura de banda.

4.1 Geometria da antena proposta

A princípio, neste projeto trata-se de uma antena monopolo do tipo impressa, a qual é amplamente utilizada em dispositivos de comunicações móveis. O perfil deste tipo de antena permite a utilização com ampla eficiência e também possui um baixo custo de fabricação e robustez mecânica quando construída. Sendo assim, foi amplamente aceito o uso desse tipo de antena em uma grande diversidade de dispositivos, como *smartphones*, *notebooks*, *tablets* e diversos outros.

O material escolhido para a confecção do monopolo foi uma placa de vidro (FR-4), onde as especificações técnicas do material serão descritas na tabela a seguir:

Tabela 4.1. Propriedades do material escolhido.

Propriedades do Material	
Tipo de Material	FR-4 (Fibra de Vidro)
Permissividade relativa (ϵ_r)	4,4
Tangente de perdas ($\tan\delta$)	0,023
Espessura total da placa	1,6 mm
Espessura do metal nas faces da placa	0,063 mm

A geometria do monopolo inicial é descrita na forma de um hexágono regular, podendo ser observada na Figura 4.1, onde suas arestas são iguais, cada um medindo 9 mm, sendo essa forma geométrica composta do material PEC (Condutor Elétrico Perfeito). O monopolo hexagonal possui a alimentação realizada por uma linha de microfita com a impedância característica $Z_0 = 50 \Omega$, largura (W_f) de 3 mm e comprimento (L_f) de 13,5 mm para o casamento de impedância. A dimensão final da antena em si é um de um retângulo com as medidas de largura (W) de 30 mm e altura (L) de 34 mm, sendo sua espessura final (h) de 1,6 mm. Enquanto a isso, o plano terra na face oposta da placa de FR-4 possui a largura igual à dimensão final da antena de 30 mm e sua altura (L_g) de 12,5 mm.

As figuras 4.1 e 4.2 a seguir nos ilustram a forma geométrica do monopolo e o plano terra na face oposta. A tabela 4.2 lista as dimensões citadas.

Tabela 4.2 Dimensões do monopolo inicial.

<i>Parâmetro</i>	Dimensão (mm)
W	30
L	34
R	9
W_g	30
L_g	12,5
W_f	3
L_f	13,5
h	1,6

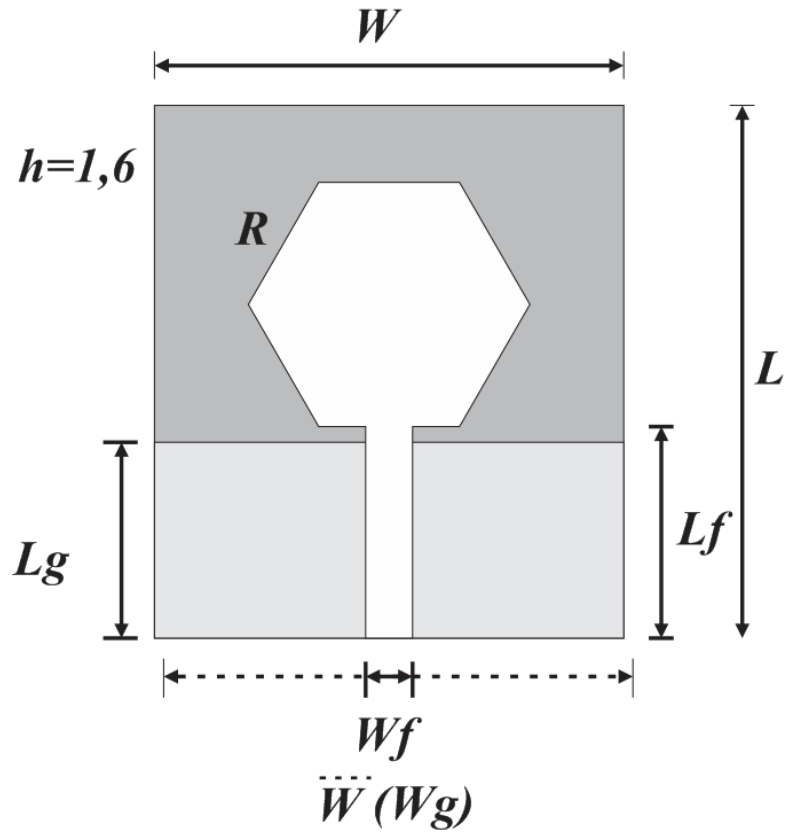


Figura 4.1 Geometria do Monopolo inicial (a).

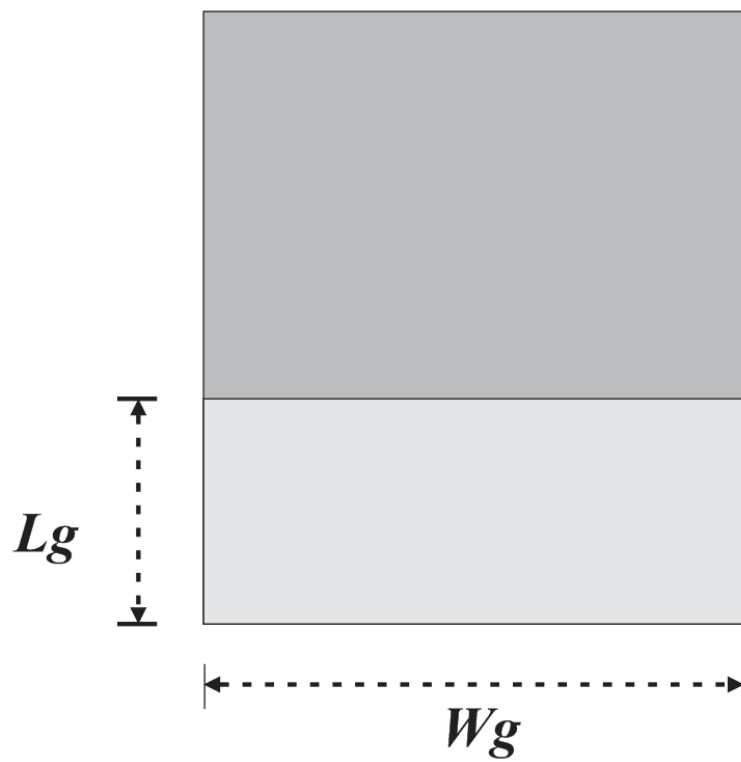


Figura 4.2 Geometria do Monopolo inicial (b).

Para uma boa adequação da impedância do monopolo o ajuste na distancia horizontal entre a base do hexágono e o limite superior do plano terra foi observado. O valor foi fixado em 1 mm, pois foi o que apresentou melhor casamento de impedância.

A figura 4.3 mostra a imagem do monopolo criado no ambiente computacional do *CST STUDIO SUITE 2010*.

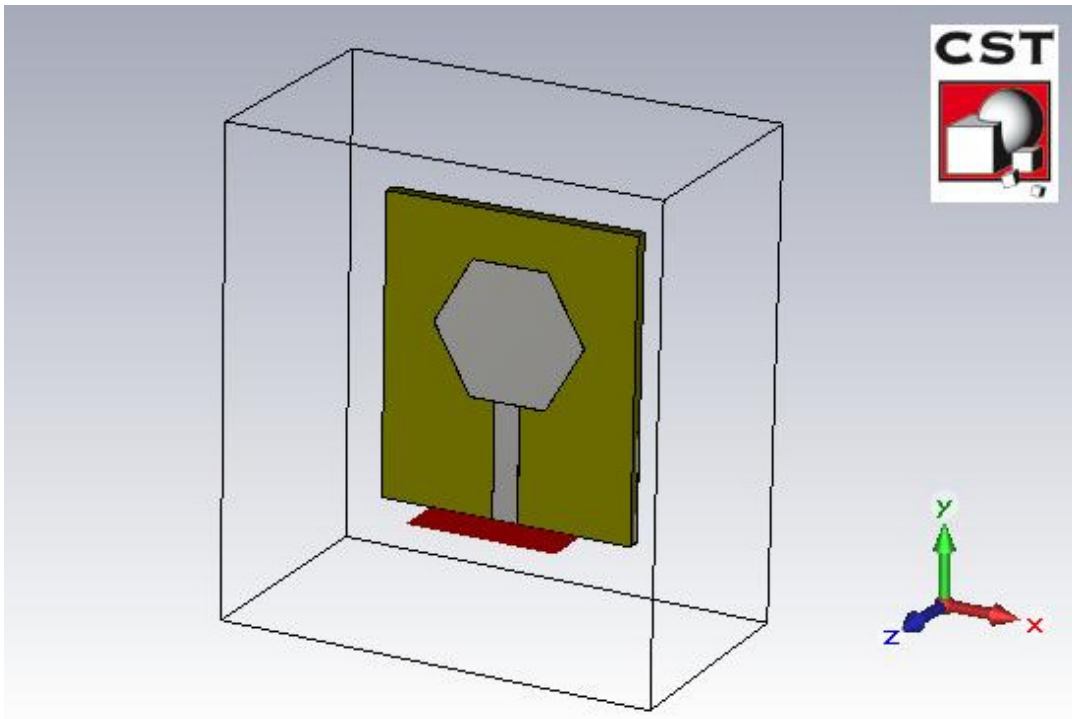


Figura 4.3 Antena Monopolo hexagonal no CST.

Após a definição da geometria da antena no *software*, obtemos os parâmetros de reflexão. Nos resultados da simulação utilizamos um pulso gaussiano modulado, na frequência próxima a 6 GHz.

O pulso utilizado é mostrado nas Figuras 4.4 e 4.5, que ilustram, respectivamente, o pulso no domínio do tempo e no domínio da frequência. O resultado da simulação deste primeiro monopolo será exibido e discutido no tópico seguinte.

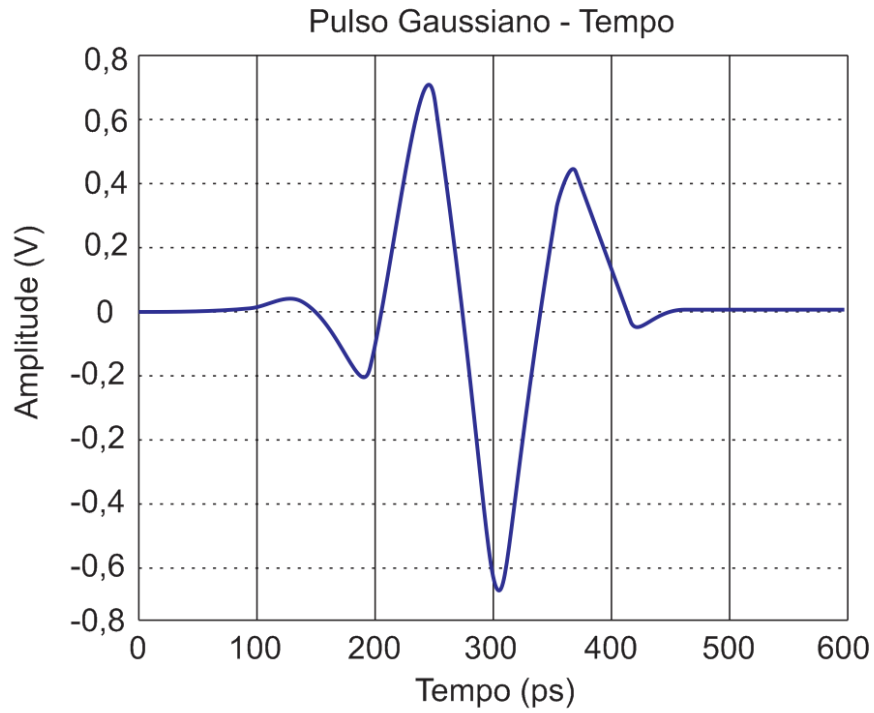


Figura 4.4 Pulso Gaussiano modulado no domínio do tempo.

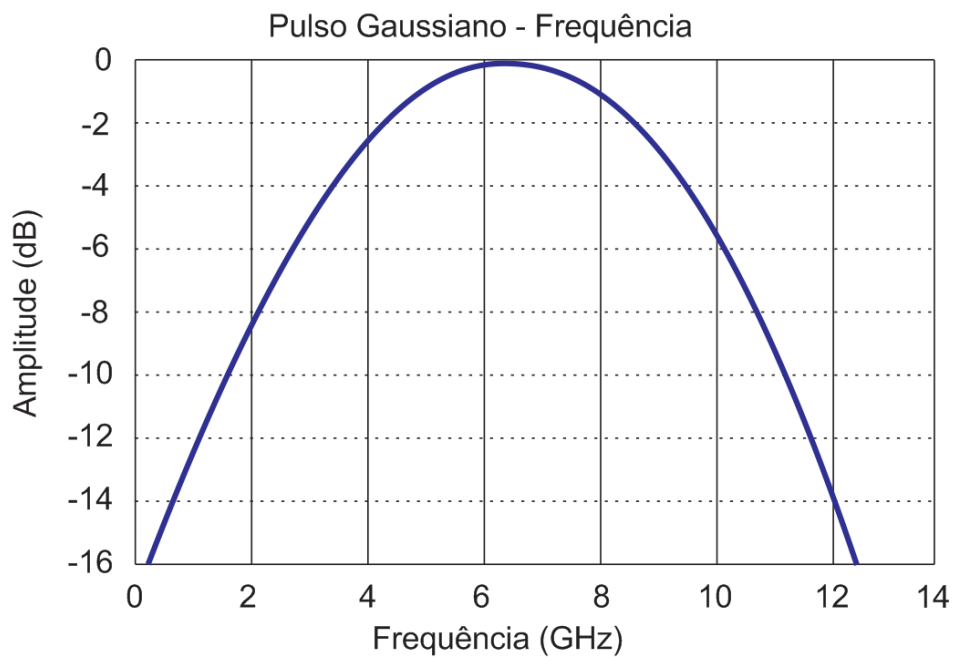


Figura 4.5 Espectro do Pulso Gaussiano modulado.

Para prosseguir a nossa análise, as primeiras modificações foram à aplicação de uma curva fractal nos lados do hexágono, com exceção do lado ligado à linha de microfita, pois o

mesmo é utilizado para realizar a excitação da antena, assim evitamos um prejuízo no casamento da linha e o monopolo.

O fractal escolhido foi a curva de *Giuseppe Peano*. Sua construção é obtida através da repetição do elemento gerador, tal como ilustrado na Figura 4.6.

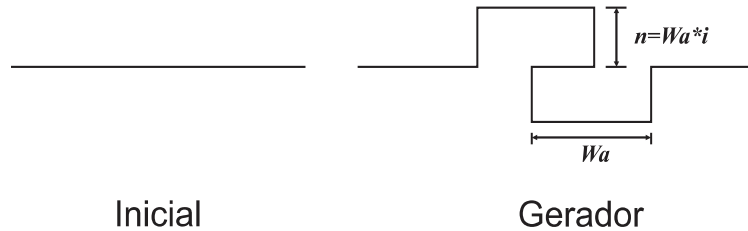


Figura 4.6 Processo de geração do pulso fractal de Peano.

Como a proposta é de um monopolo compacto, a aplicação de uma iteração apenas desta curva foi feita, por conta de que uma segunda iteração nos resultaria em dimensões de ordem muito pequenas e não contribuiriam na resposta em frequência.

Na simulação, foi usado um fator de iteração $\eta = i * W_a$, onde i representa um fator de profundidade, ou entalhe, (*indentation factor*). Fixamos o valor de i em 0,5, que nos resultou em dimensões coerentes no momento da construção do protótipo final. O valor de W_a é de 2,57 mm e η de 1,28 mm.

A aplicação da curva fractal em 5 dos seis lados do hexágono, produz a antena ilustrada na Figura 4.7.

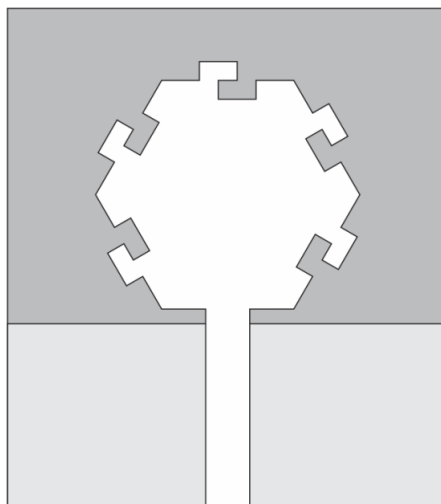


Figura 4.7 Monopolo após a aplicação da curva fractal de Peano.

Na Figura 4.8, observamos o monopolo com o fractal já aplicado no ambiente do *software* simulador. Como se trata de uma continuação do processo de construção da proposta final, as condições e parâmetros da simulação continuam os mesmos e os resultados serão apresentados e discutidos nos tópicos a seguir.

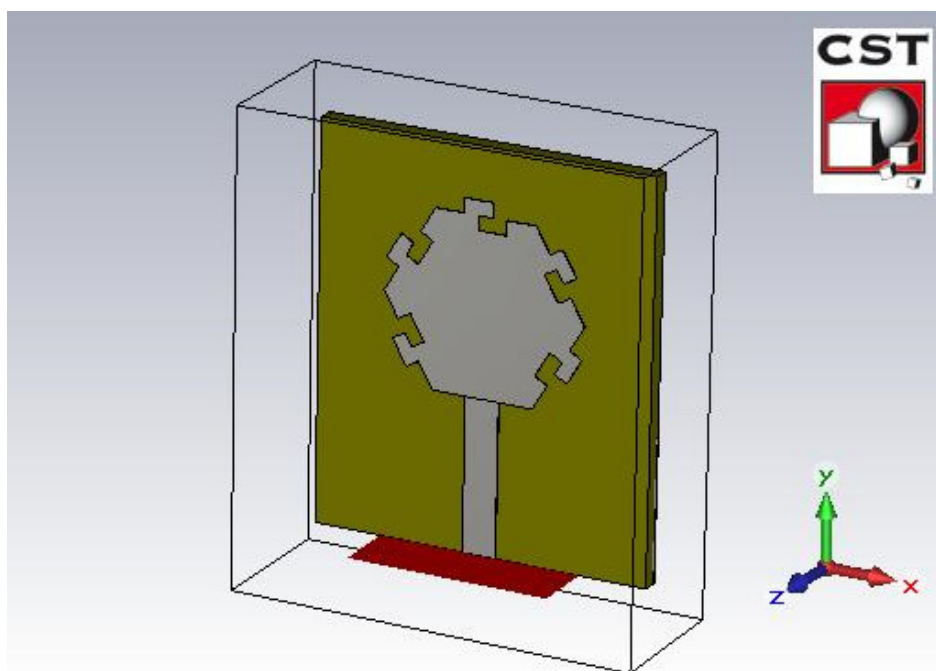


Figura 4.8 Monopolo após a aplicação da curva fractal de Peano no CST.

Podemos observar que a influencia da adição da geometria fractal de Peano nas bordas do monopolo aumentam o percurso da corrente elétrica, ou seja, o aumento do comprimento elétrico da antena. Sua introdução produz modificações na geometria da antena, com isso melhorando as características dos parâmetros de reflexão, onde observaremos nos tópicos a seguir, que foram produzidas novas ressonâncias, podendo aproximar o espectro de frequência na faixa que atende os sistemas UWB.

Considerando uma melhoria do espectro de frequência, foi realizada a última fase da modelagem do protótipo através da introdução de uma curva fractal no plano terra. Nesse caso o fractal de Koch foi usado, com isso, forçando uma mudança na densidade da corrente nas bordas da estrutura, da mesma maneira observada no monopolo, e, assim, contribuindo nos

níveis de perda de reflexão que combinado às novas ressonâncias conseguidas até este ponto, contribui na mudança do espectro de frequência com uma largura de banda extensa.

O ajuste do plano terra mostrou-se muito útil para o aumento na largura de banda. Quando usado em combinação com modificações no próprio monopolo, nos resulta em espectros de frequência com larguras de banda operacionais consideravelmente grandes.

O procedimento de obtenção da curva de Koch, é descrito na seguinte forma: Primeiramente definir um segmento de reta, com uma magnitude L_1 , após isso, dividiremos o segmento inicial em três novos segmentos de valores iguais, L_2 , e substituiremos o segmento central por um triângulo equilátero sem a sua base, dando origem ao polígono mostrado na Figura 4.9 a seguir.

Na Figura 4.9, é vista a construção do pulso fractal de Koch em algumas sucessivas iterações e, na Figura 4.10, ilustra-se o “Floco de neve de Koch”, um famoso polígono obtido através de seguidas iterações do fractal de Koch.

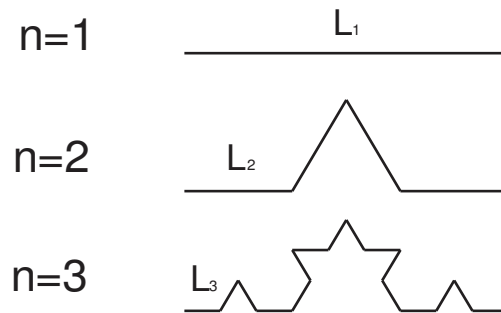


Figura 4.9 Processo de geração do pulso fractal de Koch em três iterações.

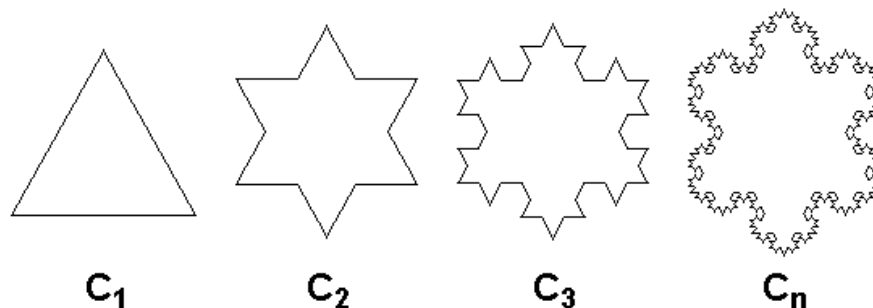


Figura 4.10 Floco de neve de Koch.

O número de iterações usadas limitou-se a três, pois, para iterações superiores, as dimensões resultantes são de ordens muito pequenas, dificultando a construção e irrelevantes na resposta em frequência, devido a isso, mostraram-se dispensáveis.

A implementação da curva foi na borda superior, pois observamos nas simulações que a aplicação nos outros lados do plano terra mostrou-se prejudicial ao casamento de impedância, distorcendo o espectro de frequência e tornando o protótipo inviável para a aplicação proposta. As Figuras a seguir mostram o protótipo final e sua modelagem no ambiente computacional do CST.

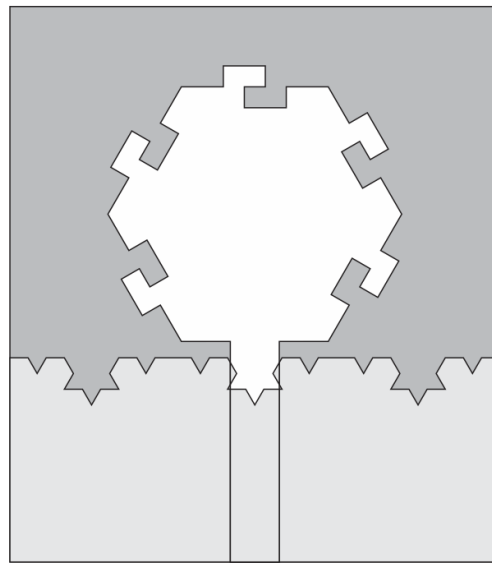


Figura 4.11 Monopolo após a fractalização do plano terra.

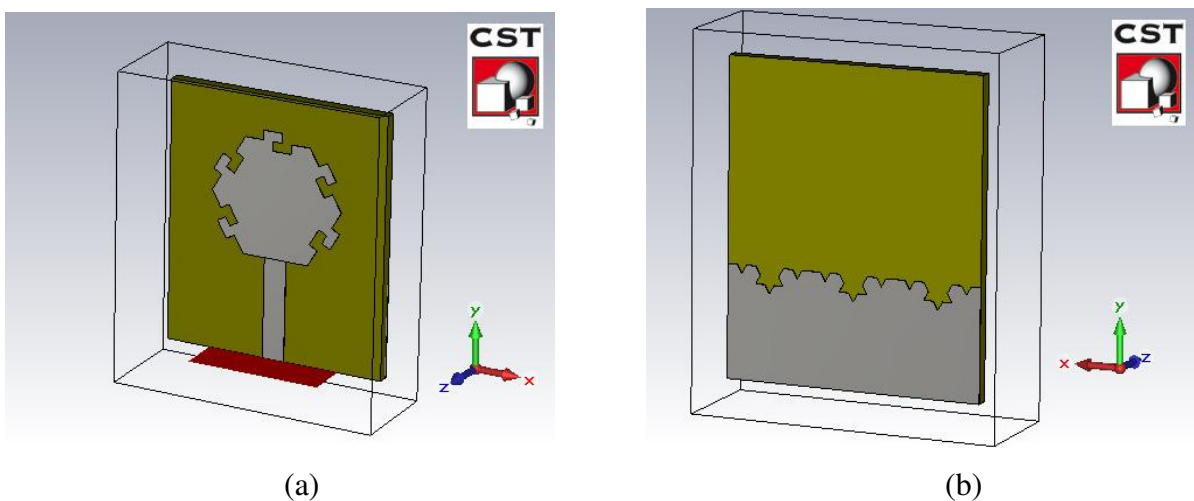


Figura 4.12 (a) Monopolo após a aplicação da curva fractal de Peano no CST e (b) Plano terra modificado com a curva fractal no CST.

4.2 Resultados e discussões

Nesta seção, são exibidos os resultados das simulações realizadas no ambiente virtual do software comercial CST e é feita uma análise desses parâmetros. Os três estágios da modelagem na seção anterior foram realizados e simulados, sendo que, para uma melhor interpretação dos gráficos, chamaremos de M0 o estágio inicial do monopolo, visto na figura 4.13, M1 a antena com o monopolo na sua primeira modificação, Figura 4.14, e M2 a antena com o plano terra modificado, Figura 4.15.

O gráfico da perda de retorno em função da frequência, da forma básica inicial M0 do monopolo é mostrado na Figura 4.13.

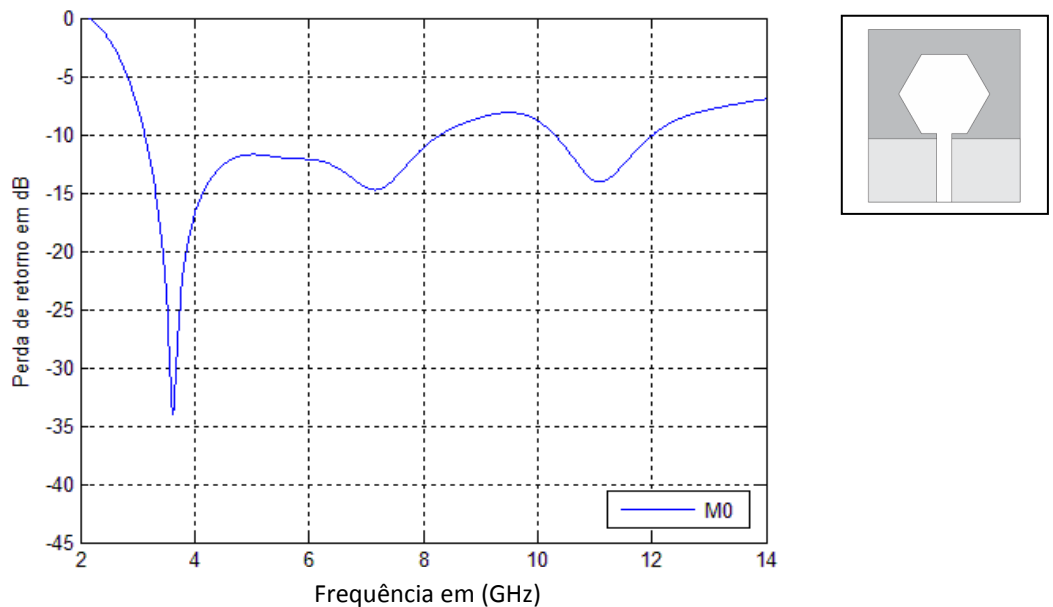


Figura 4.13 Perda de retorno simulada do monopolo inicial M0.

É observado que temos um modelo de antena impressa que atende a uma boa faixa de frequência e propriedades operacionais de banda larga e boa irradiação. A primeira faixa de frequência que atende o limiar de -10dB nos níveis de perda de retorno vai de 3,1 à 8,2 GHz, ou seja, 5,1 GHz de largura de banda. Além disso, há outra ressonância em aproximadamente 11 GHz, tendo sua faixa determinada entre 10,3 e 12 GHz, nos dando uma largura de banda de 1,7 GHz.

Esse perfil do espectro de frequência tem uma boa aplicabilidade, porém como a proposta é de um irradiador para utilizar no sistema UWB, esse modelo ainda requer uma otimização que adapte o espectro na faixa pretendida, fixada entre 3,1 e 10,6 GHz.

Conforme a metodologia descrita nas seções anteriores, a próxima simulação, M1, é o monopolo inicial combinado com a curva fractal de Peano, e sua perda de retorno é ilustrada na Figura 4.14.

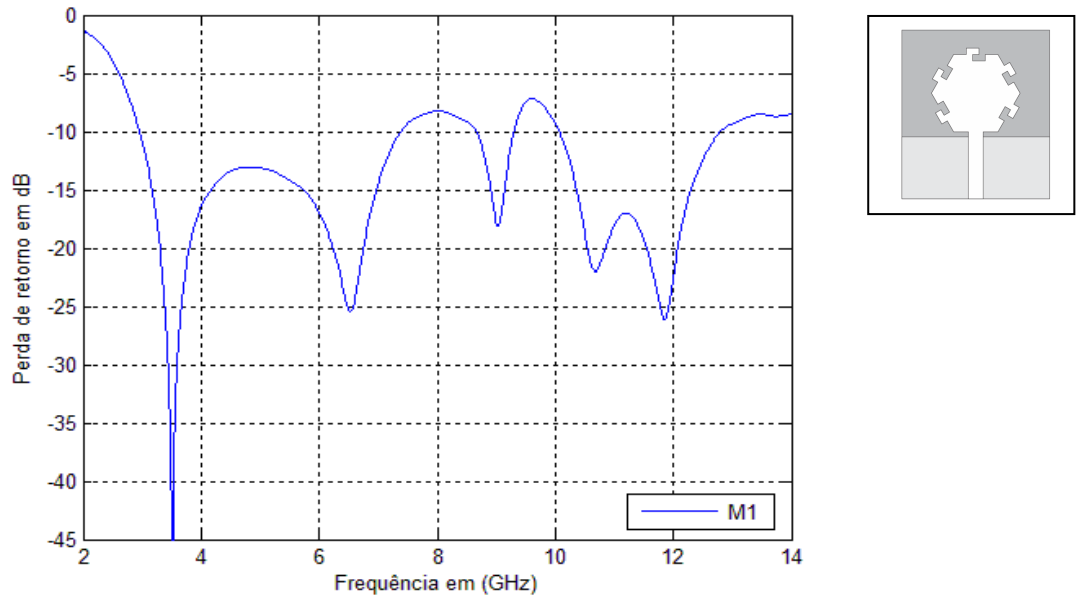


Figura 4.14 Perda de retorno simulada do monopolo M1.

É claramente visível que a adição da curva fractal de Peano combinada com a geometria hexagonal do monopolo implica em uma mudança no espectro de frequência. O aumento das continuidades adquiridas com a aplicação do fractal nas bordas do monopolo aumenta o percurso da corrente elétrica sobre o mesmo, influenciando na excitação de frequências mais altas. As novas arestas provenientes da curva de Peano possuem as dimensões de 2,571 e 1,285 mm. Com essas novas arestas o perímetro, que anteriormente era de 54 mm, passa a ser 92,54 mm. Observa-se uma nova ressonância visível em 9 GHz, em conjunto das outras ressonâncias que também foram otimizadas nos níveis de perda de retorno.

Ao compararmos com o monopolo inicial, observamos uma leve redução na largura de banda da primeira faixa de frequência ressonante, sendo uma largura de banda de 4,4 GHz. Em contrapartida, isso é compensado tanto no surgimento desta nova ressonância em 9 GHz como no aumento da largura de banda da região de frequência mais superior mostrado na curva, que compreende entre 10 e 12,8 GHz, ou seja, uma largura de banda de 2,8 GHz.

Essa otimização na geometria é bem-vinda, pois esse comportamento que produz múltiplas ressonâncias é uma das características mais atrativas dos fractais em teoria de

antenas. Assim, podemos combinar essas múltiplas ressonâncias para obter uma antena de banda larga.

Os resultados preliminares evidenciam que a principal contribuição foi o surgimento desta ressonância em 9 GHz, que anteriormente não era conseguida no monopolo inicial M0. Por fim, para complementar os procedimentos de modelagem deste protótipo, o próximo detalhe observado é nos resultados da simulação do monopolo com a alteração no plano terra.

Afim de uma melhoria ainda mais significativa dos níveis de perda de retorno e incremento da largura de banda é realizado os cortes na dimensão superior do plano terra baseado na forma de duas iterações da curva de Koch, com o mesmo objetivo de aumentar o percurso da corrente elétrica e alterar o espectro de frequência adquirido até este ponto. O resultado da antena M2 é mostrado na figura 4.15.

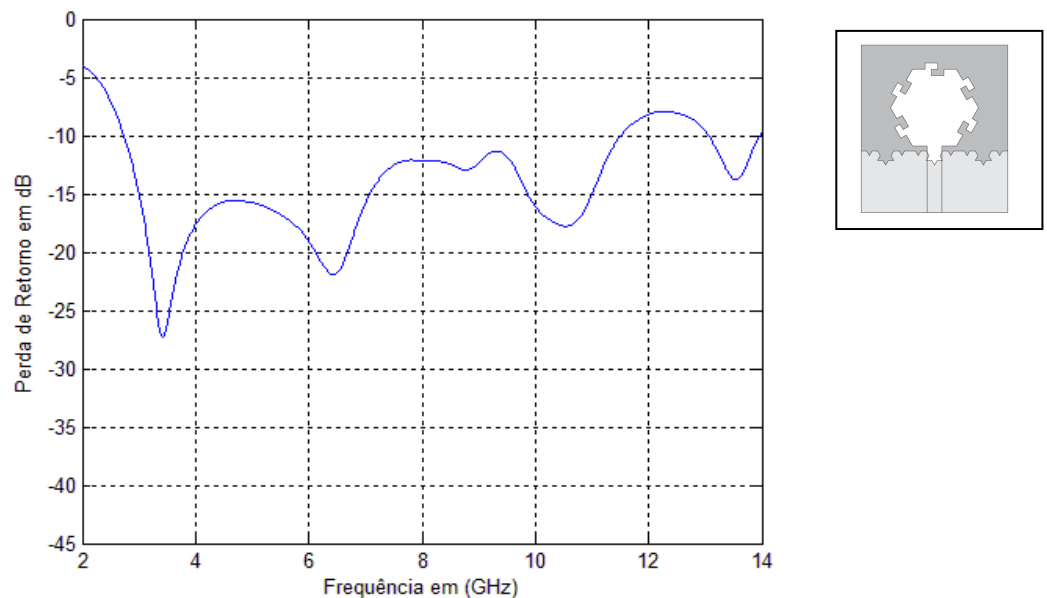


Figura 4.15 Perda de retorno simulada do monopolo M2.

A introdução da curva de Koch no plano terra contribuiu ainda mais para melhorar o parâmetro de reflexão estudado, contribuindo no casamento de impedância tanto nas frequências mais baixas como nas altas, modificando o espectro de modo que atenda à faixa pretendida. A faixa de frequência obtida neste momento atende de 2,7 a 11,5 GHz, dando uma largura de banda de 8,8 GHz, atendendo com qualidade a faixa UWB pretendida.

Para uma melhor compreensão e interpretação dos gráficos, na Figura 4.16 ilustram-se os três espectros de frequência simulados juntos.

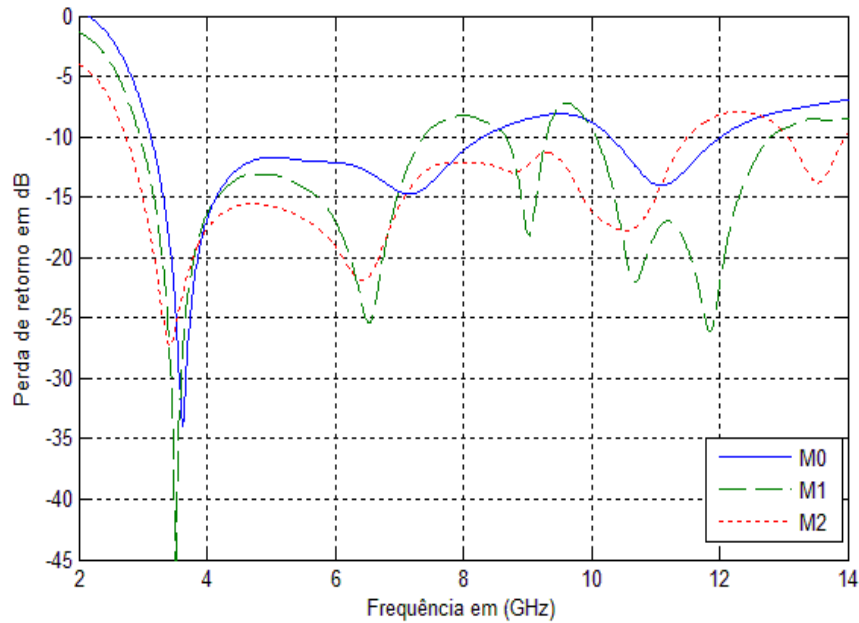


Figura 4.16 Perdas de retorno na forma inicial M0, M e M2.

É visto na análise da distribuição da corrente elétrica, Figuras 4.17-4.20, sobre as bordas metálicas do monopolo. Podemos observar que a densidade de corrente elétrica aumenta na região dos fractais conforme as descontinuidades são aplicadas nos gráficos de distribuição de corrente das Figuras 4.17-4.20.

Em comparação ao monopolo M0, a distribuição é bem mais intensa tanto nos lados aplicados do monopolo como na face superior do plano terra, refletindo diretamente no comprimento físico onde a corrente elétrica vai realizar seu percurso e alterando o coeficiente de reflexão, permitindo um melhor casamento de impedâncias em faixa mais ampla de frequência.

É possível também observar que os cortes realizados no plano terra causaram um maior mudança nos níveis de reflexão em frequências mais altas, onde o gráfico da Figura 4.15 mostra como o fractal de Koch no plano terra descreveu um melhor casamento de impedância na faixa de 5 a 12 GHz.

Este comportamento obtido com uso de elementos fractais em monopólos impressos é bastante coeso e promissor para a construção de antenas de banda larga. Para fins comparativos, as Figuras 4.17-4.20 ilustram a distribuição de correntes nos monopólos M0, M1 e M2, respectivamente, sendo duas ilustrações do estágio M2 para analisarmos a densidade de corrente em momentos diferentes, permitindo uma melhor observação da tanto no monopolo quanto no plano terra.

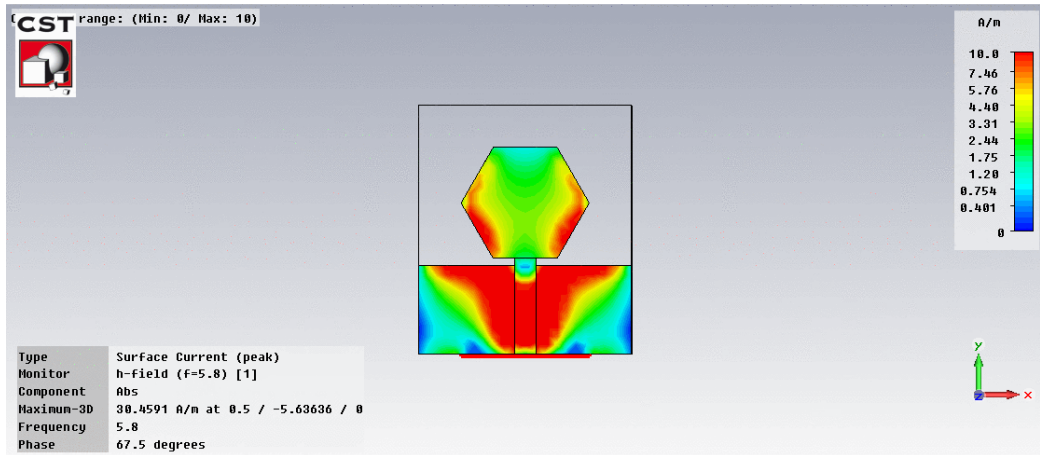


Figura 4.17 Distribuição de corrente em M0.

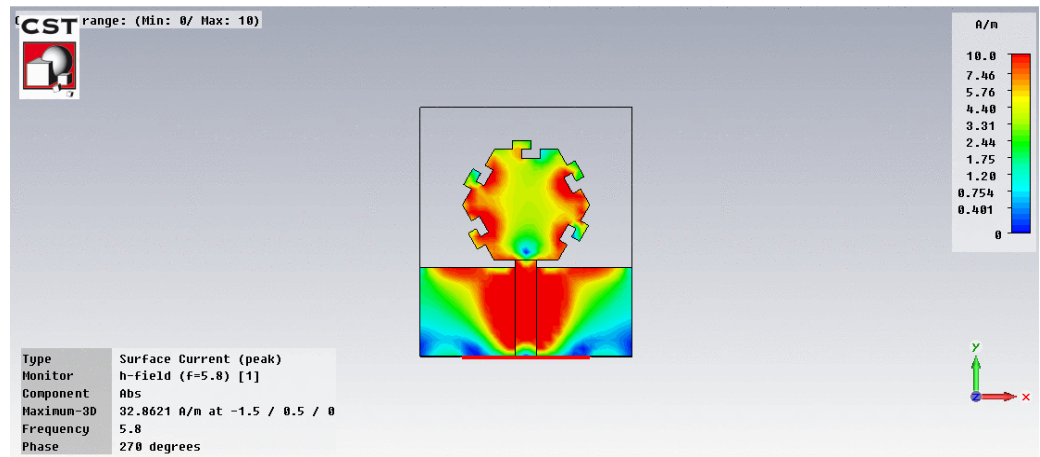


Figura 4.18 Distribuição de corrente em M1.

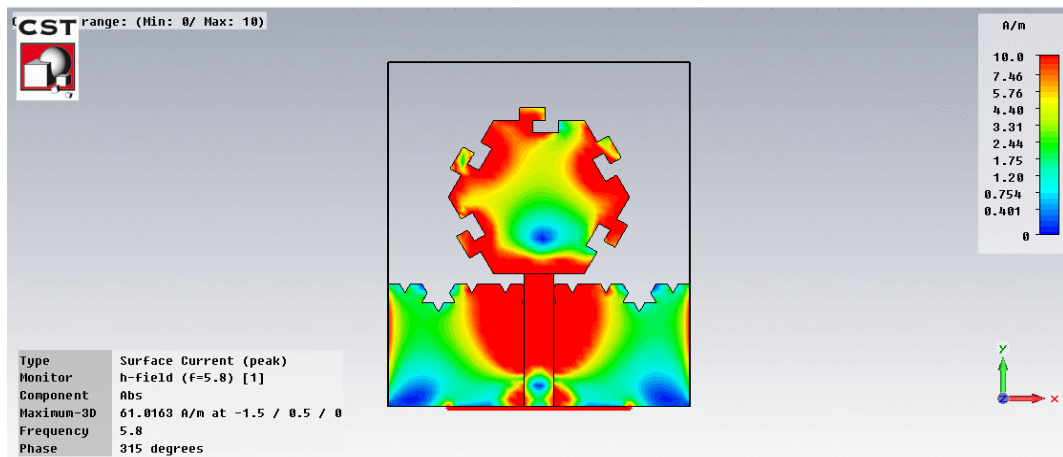


Figura 4.19 Distribuição de corrente em M2.

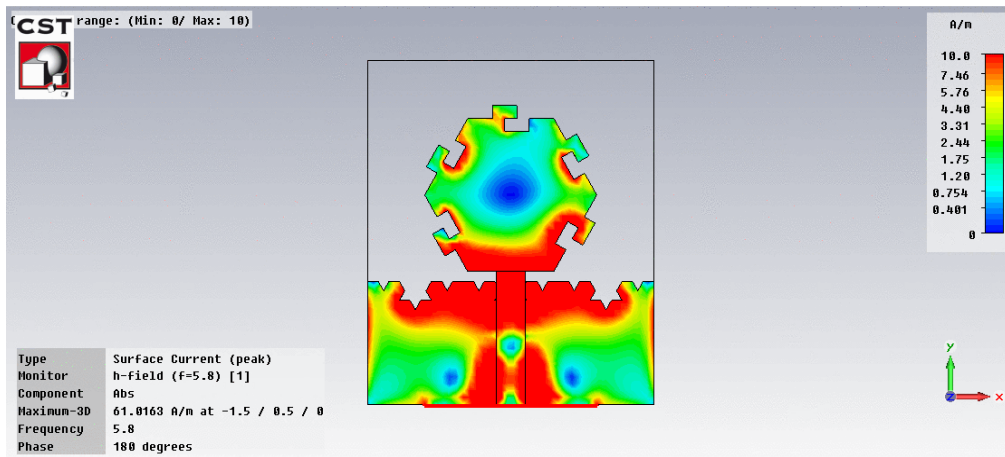


Figura 4.20 Distribuição de corrente em M2.

Para completar as análises, obtemos também como resultado das simulações os diagramas de radiação nas figuras a seguir. Na figura 4.21 podemos observar a ilustração do diagrama de radiação tridimensional de campo distante da antena M0, junto da estrutura transparente no centro da região de análise. A máxima transmissão de energia no diagrama é visto no plano x-z, o plano azimutal.

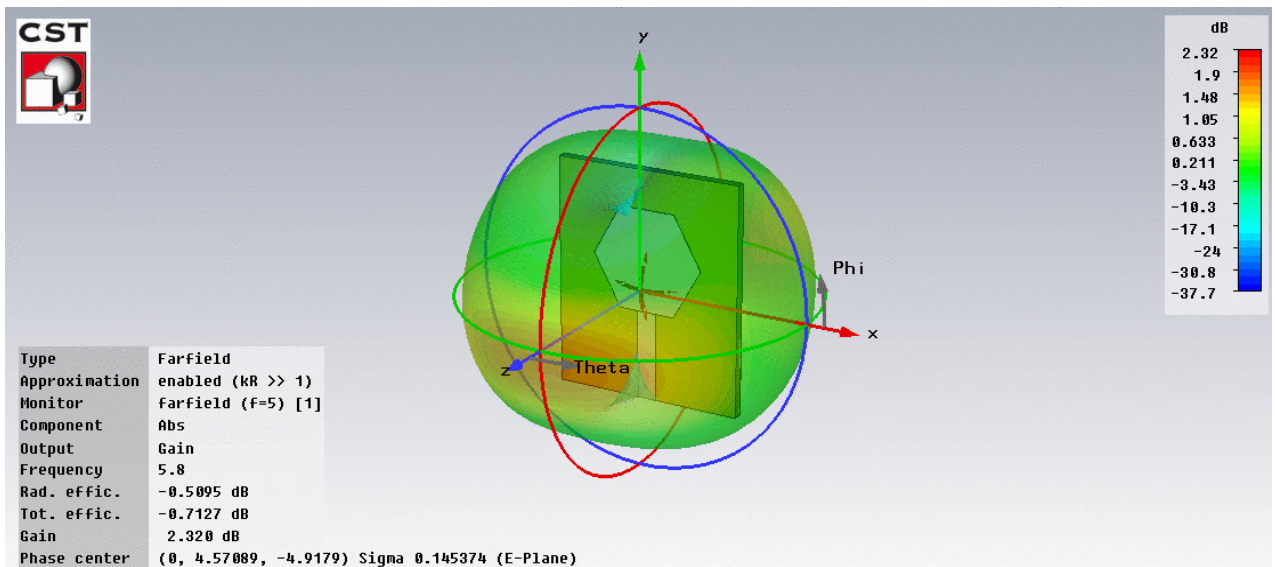


Figura 4.21 Diagrama de radiação tridimensional da antena M0.

Junto dos diagramas de radiação na forma tridimensional, foi gerado também na forma polar para um complemento da análise. Segue na Figura 4.22 o mesmo diagrama na forma polar da antena M0

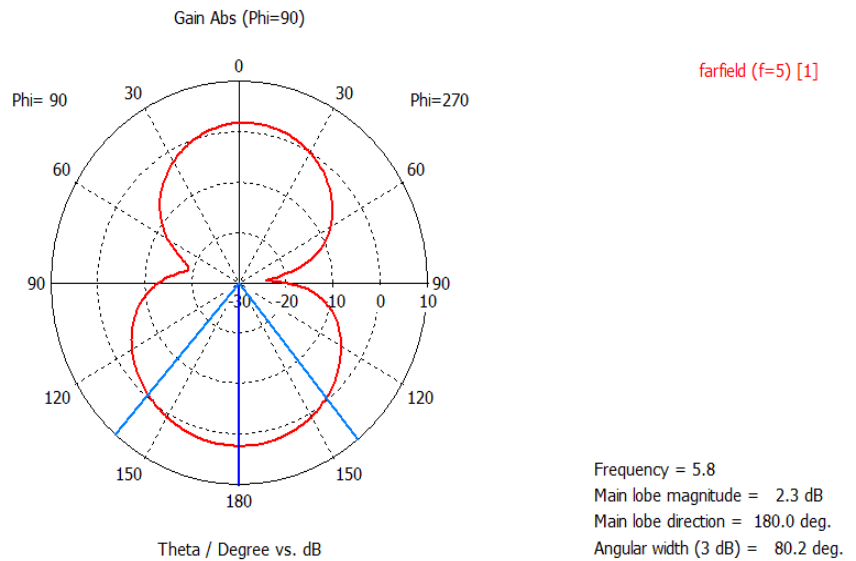


Figura 4.22 Diagrama de radiação polar da antena M0.

É visto que pouca é a mudança no diagrama de radiação com a aplicação dos elementos fractais proposta. Podemos confirmar essa afirmação com os diagramas obtidos na evolução do protótipo. Os diagramas de M1 e M2 são ilustrados nas Figuras 4.23 - 4.26.

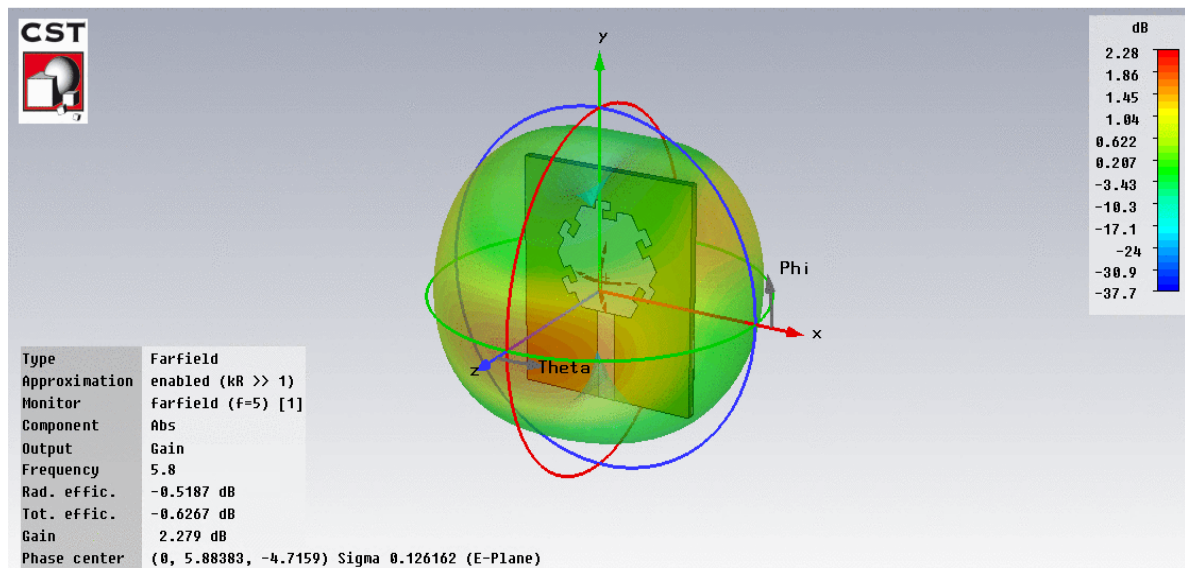


Figura 4.23 Diagrama de radiação tridimensional da antena M1.

Seguindo como nos passos anteriores, é exibido o mesmo diagrama na figura a seguir na forma polar bidimensional. Neste caso, o diagrama polar de M1. Os diagramas foram gerados em uma frequência com aplicações de banda larga, neste caso, 5,8 GHz.

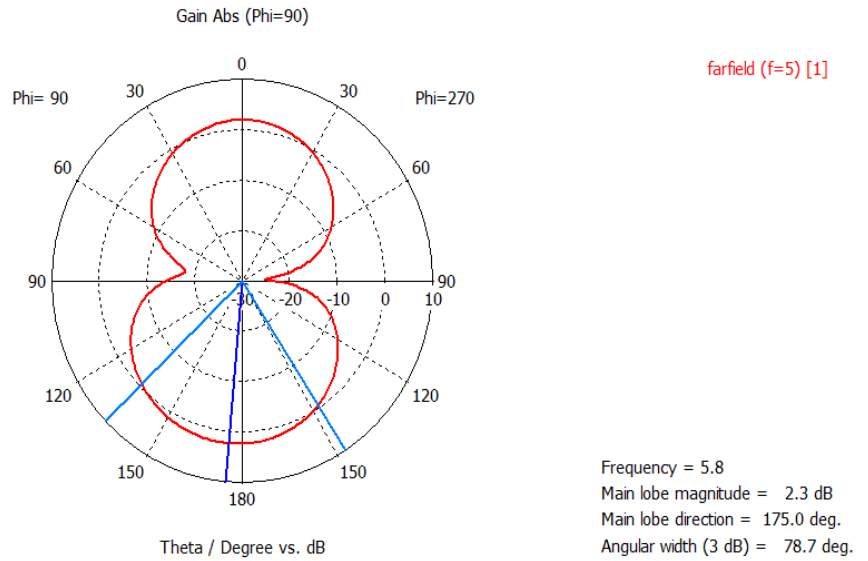


Figura 4.24 Diagrama de radiação polar da antena M1.

Por fim, analisaremos os diagramas do protótipo final, com os elementos fractais aplicados no monopolo e no plano terra.

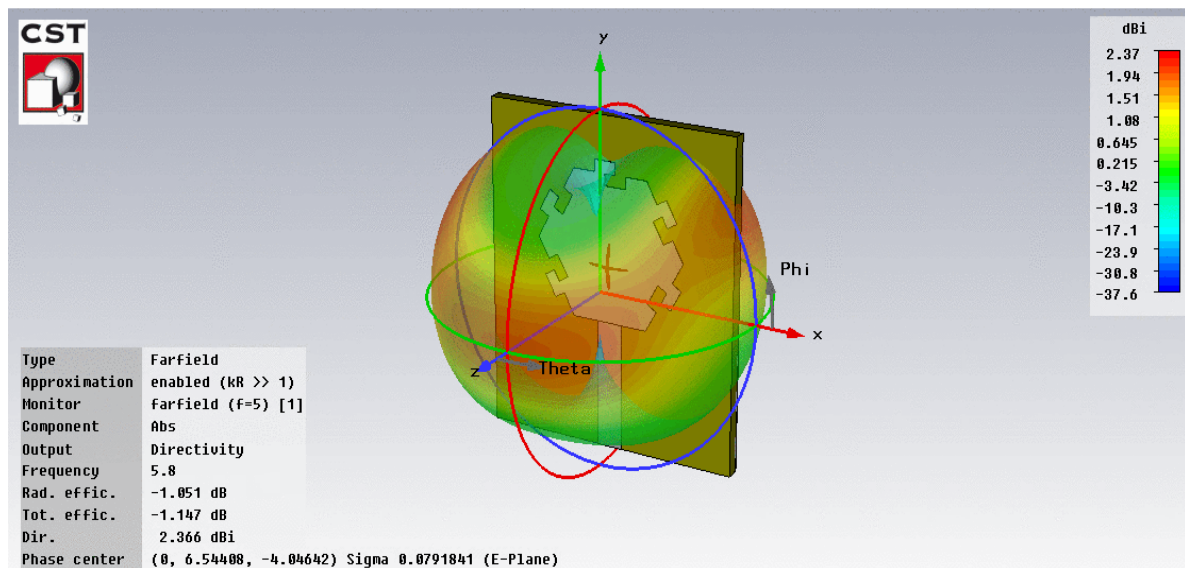


Figura 4.25 Diagrama de radiação tridimensional da antena M2.

Para finalizar a análise dos diagramas de radiação durante as modelagens do monopolo, segue na imagem , seguindo os passos em comum aos anteriores, o diagrama do protótipo M2 (protótipo final) na forma polar bidimensional.

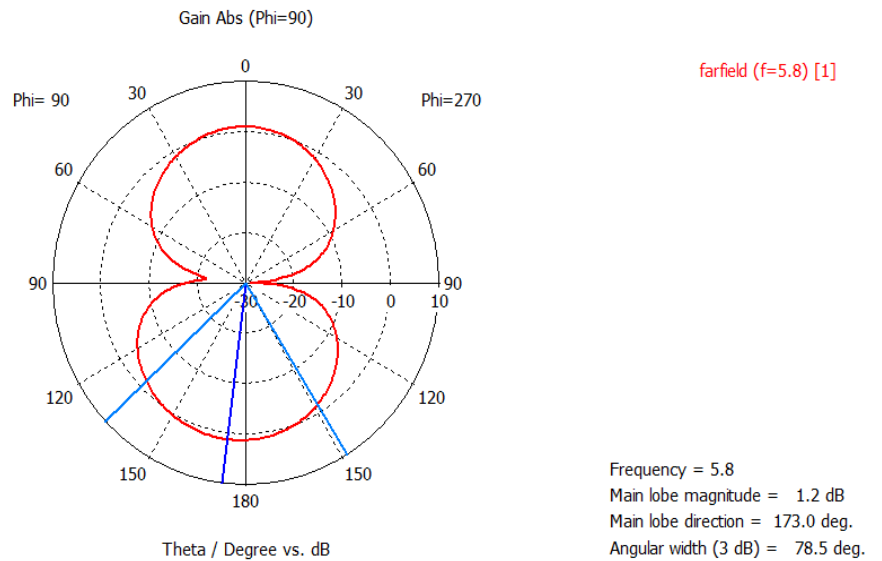


Figura 4.26 Diagrama de radiação polar da antena M2.

4.3 Considerações finais

O presente capítulo descreve a concepção do protótipo de uma antena para aplicações na faixa UWB, onde detalhamos a metodologia de aplicação do projeto e a descrição da aplicação no ambiente computacional do software simulador CST, onde as simulações de cada estágio do protótipo nos resultaram em parâmetros que nos permitem a discussão da aplicação de elementos fractais em antenas para uma otimização dos espectros de frequência. Os resultados permitiram adequar na faixa pretendida. Como os resultados obtidos mostraram-se adequados para uma solução do problema proposto, o protótipo serve para o próximo momento do projeto, que consiste na confecção e montagem deste protótipo, juntamente de uma campanha de medições para a comparação dos resultados medidos com os simulados.

O próximo capítulo trata em específico, onde será descrita a metodologia da confecção, dos equipamentos adequados e da campanha de medições.

CAPÍTULO 5

CONFECÇÃO E MEDIÇÕES DO PROTÓTIPO

Apresentaremos neste capítulo os procedimentos utilizados na confecção do protótipo proposto nesse projeto, seguido das medições de perda de retorno do protótipo finalizado, com o fim de validar os resultados simulados e afirmar a operabilidade da mesma nas frequências de operações propostas inicialmente.

5.1 Processos de confecção da antena proposta

A realização da confecção do protótipo foi possível através de um método de corrosão artesanal com a utilização de Percloroeto de ferro, sendo esta metodologia viável para esse tipo de procedimento, pois o atrativo é não só a facilidade que o método oferece, mas ao mesmo tempo nos dando uma precisão bem alta nos detalhes do protótipo, nos resultando em um dispositivo bem feito e de baixo custo de confecção. Todo o procedimento descrito foi realizado no espaço físico do Laboratório de Computação e Telecomunicações – LCT da Universidade Federal do Pará – UFPA, porém a campanha de medições do protótipo foi realizada nos laboratórios da Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRN onde os equipamentos de medições necessários estavam disponíveis. A seguir, na tabela 5.1, lista-se o material utilizado na confecção da antena proposta.

Tabela 5.1 Material utilizado na confecção da antena.

Material utilizado	Quantidade
Placa de FR-4 de 50x50 cm ($\epsilon_r = 4,4$; $h = 1,6$ mm)	01 Un.
Conector tipo SMA fêmea	01 Un.
Ferro de Solda	01 Un.
Solda estanho	01 m.
Percloroeto de Ferro	½ litro

Conforme já citamos anteriormente, utilizamos o ácido Percloroeto de ferro para a corrosão do metal na placa de FR-4. Inicialmente imprimimos a forma da antena na placa de FR-4 com uma folha adesiva, sendo que o desenho foi impresso nessa folha com uma impressora a laser. Para a impressão da forma na placa, aquecemos a placa metálica e fazemos

contato com a folha adesiva. A Figura 5.1 mostra as formas do protótipo na folha adesiva já impressa, tanto a face com o monopolo quanto o plano terra.

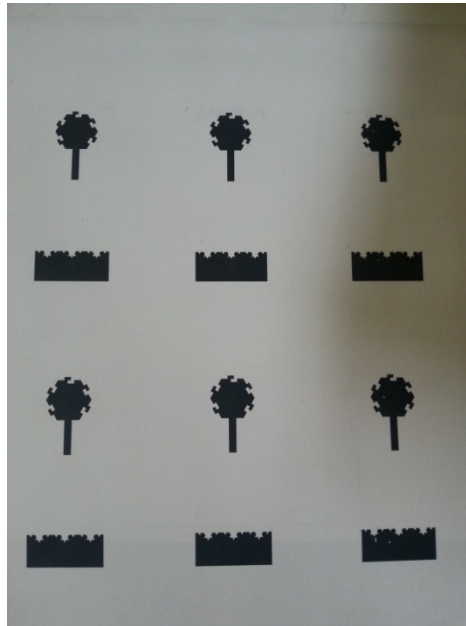


Figura 5.1 Folha adesiva com o protótipo impresso.

Com o aquecimento da folha em contato a placa metálica, obtemos a impressão do monopolo na própria placa. Com isso, podemos colocar a mesma em banho de solução aquosa do ácido Percloro de ferro que se encarrega de corroer as partes metálicas não pintadas. Este método é bem eficaz, pois possui um custo bem reduzido e os detalhes do monopolo foram reproduzidos de forma precisos no resultado final. Na Figura 5.2, vemos a forma do monopolo já impressa na placa metálica e também esta sendo mergulhada no ácido.



Figura 5.2 Processo de corrosão da placa metálica.

Após a corrosão, o resultado é uma antena feita com uma alta qualidade nos detalhes da geometria da antena proposta, tanto no monopolo como no plano terra. Por fim, é realizada a solda do conector fêmea SMA em baixo da antena. O protótipo pronto, junto do conector, possui uma altura de 4,5 cm e largura de 3 cm, seguindo de acordo com o projeto. Observamos o protótipo pronto nas Figuras 5.3 e 5.4, onde vemos a face frontal e a face traseira, respectivamente.

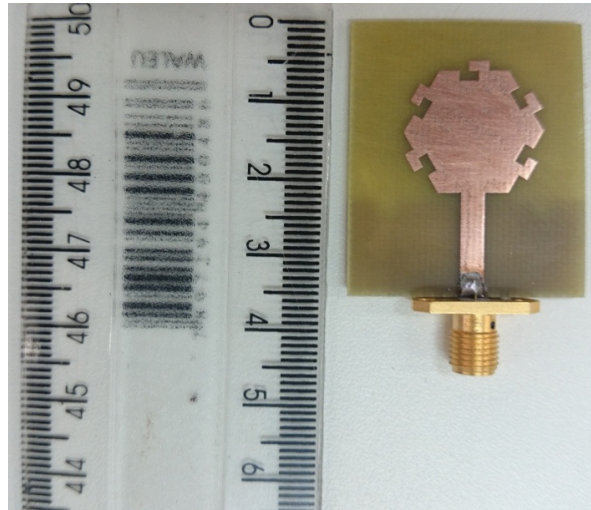


Figura 5.3 Imagem da face frontal do protótipo.

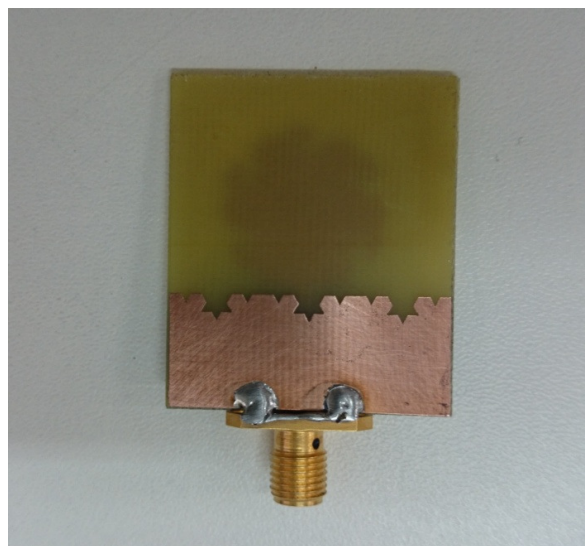


Figura 5.4 Imagem da face traseira do protótipo.

Com o protótipo pronto, o passo seguinte foi a realização das medições para a comparação dos resultados obtidos com os simulados. A próxima seção detalha as medições.

5.2 Medições e comparação dos resultados.

As medições de perda de retorno da antena proposta foram realizadas com a utilização do equipamento *PNA-L Network Analyzer* da marca *Agilent Technologies*, sendo este de propriedade dos laboratórios da UFRN. A faixa de frequência em que o equipamento pode trabalhar vai de 300 kHz a 13,5 GHz. Junto do equipamento, foi utilizado um conector conversor *tipo N* macho para *tipo SMA* macho e um cabo coaxial de 1 metro, todos possuindo impedância característica de 50Ω .

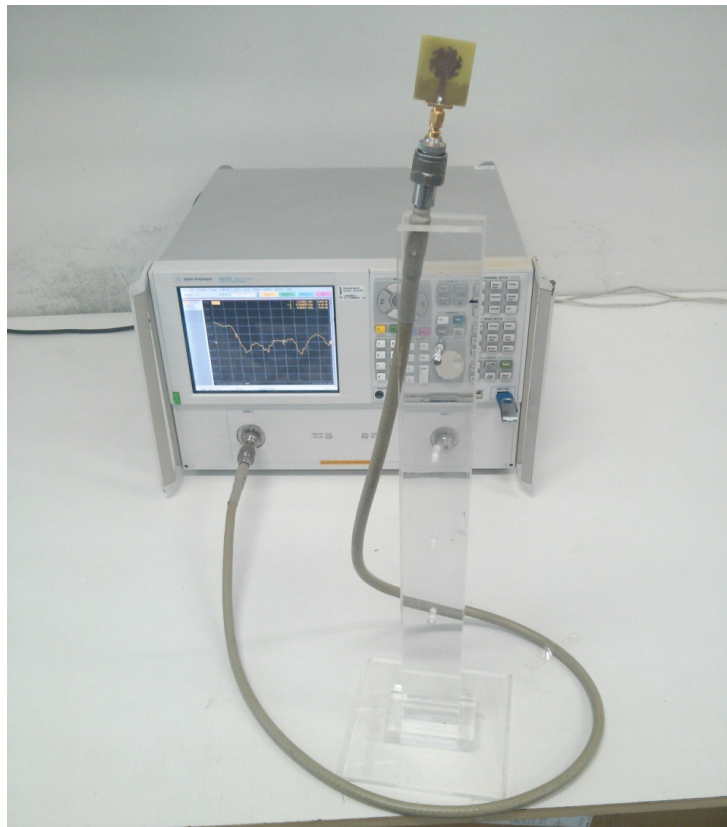


Figura 5.5 Setup de medição da antena proposta

Os resultados gerados pelo equipamento nos permitem avaliar a conformidade com os resultados simulados, onde a comparação com de ambos os resultados é o objetivo pretendido. Em sua grande maioria, o comportamento do espectro de frequência simulado segue uma tendência igual em comparação ao mostrado pelo equipamento de medição.

Vejamos agora, na Figura 5.6, a imagem dos resultados de perda de retorno obtidos através do equipamento de medições.



Figura 5.6 Perda de retorno (S11) medida.

É possível observarmos coerência no comportamento do espectro de frequência obtido na simulação em comparação com o medido. Nos pontos 1 a 2 temos uma largura de banda de 10,3 GHz. Para uma melhor observação e interpretação dos dados obtidos, na figura 5.7 a seguir mostraremos o gráfico obtido nas medições junto aos dados obtidos através da simulação no CST.

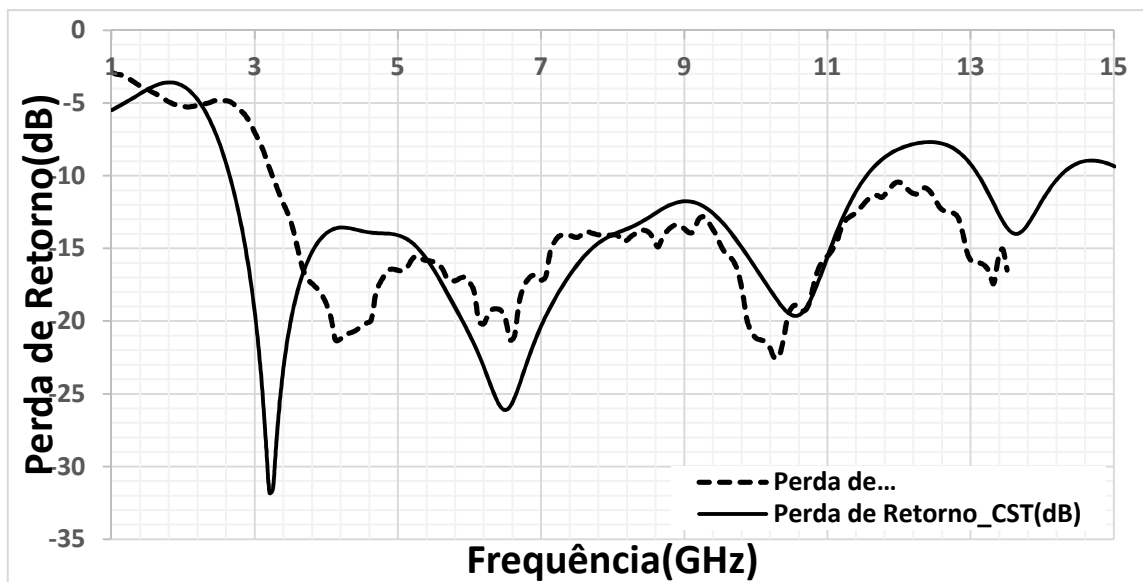


Figura 5.7 Comparativo da perda de retorno medida com a simulada.

Através dessa comparação dos dados medidos com os simulados, observamos as tendências na curva de perda de retorno simulada e medida sendo compatíveis em sua maior

parte. Um detalhe que devemos ressaltar é na primeira ressonância dos resultados medidos, onde a faixa de frequência inicia em 3,2 GHz, uma leve disparidade com os simulados, porém não o suficiente para prejudicar a aplicação na faixa UWB pretendida, já que em todo o restante do espectro o modelo da antena se adequou com qualidade. Por fim, com o auxílio da Tabela 5.2, vamos fazer um comparativo das faixas de frequências que os dados nos apresentaram juntamente da faixa pretendida.

Tabela 5.2 Comparativo das faixas de frequência simuladas e medidas com a faixa UWB pretendida.

Origem dos dados	Frequência inferior (GHz)	Frequência superior (GHz)	Largura de Banda (GHz)
Simulados	2,7	11,5	8,8
Medidos	3,2	13,5	10,3
Padrão Sistema UWB	3,1	10,6	7,5

5.3 Considerações Finais

Neste capítulo foi apresentada a validação do protótipo da antena através da confecção do mesmo seguido de uma campanha de medições. Foi utilizado como equipamento na medição um analisador de Espectro, que nos permitiu observar o comportamento do espectro de frequência que o protótipo proporciona. Com os resultados gerados, podemos fazer uma análise comparando com os dados oriundos das simulações no CST, e com isso verifica-se que o protótipo atendeu bem à proposta inicial.

No capítulo seguinte apresenta um panorama com as considerações finais resultantes de todas as análises desse trabalho e propostas para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES

O trabalho apresentado mostra a realização de um estudo da aplicação de elementos fractais na construção de monopolos compactos com altas larguras de banda, em específico, a proposta de um monopolo para aplicações na faixa UWB, onde o uso das curvas fractais funciona como um otimizador na largura de banda.

Como ponto de partida, foi feito um estudo sobre geometrias fractais e suas propriedades e, juntamente disso, uma revisão da aplicação dessas curvas na concepção de antenas e suas contribuições.

A revisão bibliográfica sobre essa temática nos apresenta a geometria fractal como uma ferramenta sólida na pesquisa e realização de projetos de antenas, sendo que o comportamento multibanda um dos pontos mais atrativos. Com esse comportamento foi possível propor uma antena, onde a implantação dos elementos fractais serviu de ferramenta para uma expansão da largura de banda, e assim, atendendo a algum sistema que exija a largura de banda alta. No caso dessa proposta, adequamos ao sistema UWB que determina uma largura de banda de 7,5 GHz, considerada larga para uma aplicação terrestre.

Um monopolo compacto de forma hexagonal foi utilizado como a base do projeto e a partir dele, a aplicação da curva fractal de Peano nas suas dimensões nos resultou em um aumento no número de ressonâncias no espectro de frequência. Esse comportamento multibanda foi associado com a aplicação de outra curva fractal, de Koch, na borda superior do plano terra, que proporcionou uma melhoria no casamento de impedância em todo o espectro, permitindo uma largura de banda bem ampla, entre 3,2 GHz e 13,5 GHz, que pudesse atender a faixa de frequência previamente especificada.

Essas modelagens foram realizadas no *software* computacional CST 2010, e após os dados resultantes das simulações nos mostrarem que esse tipo de aplicação é uma boa ferramenta para a otimização da largura de banda. O passo seguinte foi à confecção do protótipo da antena através do método de corrosão artesanal.

Com a antena resultante em mãos, foi possível uma comparação dos dados simulados juntos dos medidos e, assim, verificou-se concordância entre estes dados, validando a metodologia que este trabalho apresentou. Por fim, esse projeto consegue afirmar e contribuir na questão do uso de curvas fractais junto de teoria de antenas como uma ferramenta eficiente na melhoria da largura de banda e controle do espectro de frequência.

Com essas conclusões em mãos, os passos posteriores consistem em realizar medições de diagramas de radiação em diversas frequências e comparar com os simulados; aplicação de outras curvas fractais em outros tipos de estruturas, visando atender a aplicações diferenciadas, como antenas de outros modelos além das impressas, arranjos, superfícies seletivas de frequência (FSS) e diversas mais.

REFERÊNCIAS

- [1] MIGUEL ANGELO CORREA CARDOSO M. A. C. *Tecnologia 3g: Uma visão prática.*, **Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS**, 2008, Trabalho de conclusão de curso de especialização, disponível em: <http://www.lume.ufrgs.br>.
- [2] SGANZERLA, A. R., HENRIQUE, L. RÜCKER, DE A., *Estudo Comparativo entre as redes 3G e 4G*, **Pontifícia Universidade Católica do Paraná, PUC-PR**, 2010, disponível em : <http://www.ppgia.pucpr.br>.
- [3] CORNÉLIO, JOSÉ BRUNO MACIEL, *Inovações Tecnológicas no Setor de Telecomunicações no Brasil: Desafios e Oportunidades do LTE para expansão da Telefonia Móvel*, **Escola Brasileira de Administração Publica e de Empresa da Fundação Getulio Vargas - EBAPE/FGV**, 2011, Dissertação de Mestrado, disponível em: <http://bibliotecadigital.fgv.br>.
- [4] SVERZUT, JOSÉ UMBERTO. *Redes GSM, GPRS, EDGE e UMTS: evolução a caminho da terceira geração (3G)*. 1º Ed. São Paulo: Érica, 2005.
- [5] KUMAR, A., LIU, Y., SENGUPTA, J., DYVIA, **Evolution of Mobile Wireless Communication Networks : 1G to 4G**, International Journal of Electronics & Communication Technology, Vol. 1, 2010.
- [6] ANATEL. [Online], <http://www.anatel.gov.br>, Acessado em: 10 de junho de 2014.
- [7] MINISTÉRIO DAS COMUNICAÇÕES DO BRASIL. [Online]. Disponível em: <http://www.mc.gov.br/acoes-e-programas/tv-digital>, Acessado em 10 de junho de 2014.
- [8] FLORO, P. [Online], <http://blogs.ne10.uol.com.br/mundobit/2014/10/12/4g-brasil-como-funciona-e-qual-situacao-brasil-apos-os-leiloes/>, Acessado em 10 de Junho de 2014.
- [9] FERREIRA, H. R. O., *Projeto de Antenas Multibandas Integradas para Terminais 4G*, **Universidade Federal do Pará – UFPA**, 2014, Dissertação de Mestrado, Disponível em: <http://www.ppgee.ufpa.br/>.
- [10] BENEDETTO, M. G. DI, KAISER, T., MOLISH, A. F., OPPERMAN, I., POLITANO, C., PORCIN, D., *UWB Communication Systems A Comprehensive Overview*, Nova York: Hindawi Publishing Corporation, 2006.

- [11] FCC Report and Order for Part 15 Acceptance of Ultra Wideband (UWB) Systems from 3.1 - 10.6 GHz, FCC, Washington, DC, 2002.
- [12] D. H. WERNER AND S. GANGULY, **An overview of fractal antennas engineering research**, IEEE Antennas and Propagation magazine, vol 45, nº 1 pp 38-56, Fervereiro de 2003.
- [13] MANDLEBROT, B. B., *The Fractal Geometry of Nature*, New York: W.H. Freeman, 1983.
- [14] MANDLEBROT, B. B. *Objetos Fractais: forma, acaso e dimensão*, Lisboa: Gradiva Publicações, 1991.
- [15] N.COHEN, **Fractal Antenna Applications in Wireless Telecommunications**, in Professional Program Proc. of Electronic Industries Forum of New England, p. 43-49, 1997, IEEE.
- [16] PUENTE, C. ROMEU, J. POUS, R. CARMADA, A. **On the Behavior of the Sierpinski Multiband Fractal Antenna**. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 46, p. 517-524, 1998.
- [17] OLIVEIRA, E. E. C. ;MARTINS, R DE A. ; ASSUNÇÃO, A. G. D. **Antenas de Microfita utilizando a curva de fractal de Minkowski**, p.8, 2008.
- [18] S.SUGANTHI, S.RAGHAVAN, **Design and Simulation of Planar Minkowski Fractal Antennas**, Wireless Communication, Vehicular Technology, Information Theory and Aerospace & Electronic Systems Technology (Wireless VITAE), 2011.
- [19] **IEEE Transactions on Antennas and Propagation**, vols AP-17, Nº3, Maio de 1969; AP-22, Nº 6, Part II, Novembro de 1983.
- [20] BALANIS, C. A., *Teoria de Antenas: Análise e Síntese*, Rio de Janeiro: LTC, 2009, 3º ed.
- [21] COSTA, S. C. C., *Antenas, ambiente computacional para análise e projeto de antenas e estruturas de casamento*. **Universidade Federal do Pará – UFPA**, 2000, Dissertação de Mestrado, Disponível em: <http://bc.ufpa.br>.

- [22] JAMPRO [Online], *Antennas, inc*; <http://www.jampro.com/document-library.html>; acessado em: 17 de Dezembro de 2014, 16:26.
- [23] SHADIKU M. N. O., *Elementos de eletromagnetismo*, Bookman: 1997, 3º Ed.
- [24] GARZÓN, J. L. T., *Desenvolvimento e implementação de antena planar para aparelhos celulares*, **Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS**, 2013, Dissertação de Mestrado, Disponível em: <http://www.lume.ufrgs.br/>.
- [25] POPRZEN, N., GACANOVIC, M. [Online], **Fractal antenna: Design, Characteristics and Application**, Disponível em: http://www.phd.etfbl.net/files/Works_PDF/Poprzen%20Nemanja%20.pdf.
- [26] NATILUS [Online], Disponível em: <http://nautilus.fis.uc.pt/softc/programas/manuais/fractais/manual.htm>, Acessado em: 15 de Agosto de 2014.
- [27] SÁNCHEZ-HERNÁNDEZ, D. A., *Multiband Integrated Antennas for 4G Terminals*, Norwood: 2008, 1º Ed.
- [28] OLIVEIRA, E. E. C. DE, SILVA, P. H. F., SILVA, S. G., **Microfita utilizando a curva fractal de koch**, 3º Congresso de Pesquisa e Inovação da Rede Norte Nordeste de Educação Tecnológica (CONNEP), 2008.
- [29] LOPES, F., M., *Fractal Antennas for Wireless Communication Systems*, **Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP)**, 2009, Dissertação de Mestrado, Disponível em: <http://sigarra.up.pt>.
- [30] WERNER, D. H., GANGUL, S., **An Overview' of Fractal Antenna Engineering Research**, IEEE Antennas and Propagation Magazine, Vol. 45, Nº. I, Fervreiro de 2003.
- [31] DALSANIA, P., SHAH, B., UPADHYAYA, T., DWIVEDI, V.V., **Analysis of Multiband Behaviour on Square Patch Fractal Antenna**, International Conference on Communication Systems and Network Technologies (CSNT), 2012, Índia.
- [32] SALEEKAW, S., MAHATTHANAJATUPHAT, C., AKKARAEKTHALIN, P., KRAIRIKSH, M., **Monopole antennas with modified Minkowski fractal geometry**, 5th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology. P. 213-216, 2008.

- [33] CHOUKIKER, Y. K., SHARMA, S. K., BEHERA, S. K., **Hybrid Fractal Shape Planar Monopole Antenna Covering Multiband Wireless Communications with MIMO Implementation for Handheld Mobile Devices**, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 62, p. 1483 – 1488, Dezembro de 2013.
- [34] MAHATTHANAJATUPHAT, C., SALEEKAW, S., AKKARAEKTHALIN, P., **A rhombic patch monopole antenna with modified minkowski fractal geometry for umts, wlan, and mobile wimax application**, Progress In Electromagnetics Research, PIER 89, 2009.
- [35] SANTOS, N. M. F.; FERREIRA, H. R. O.; MARTINS FILHO, W. J. C.; ALCANTARA NETO, M. C.; BARROS, F. J. B.; CAVALCANTE, G. P. S.; **“Design and Analysis of square monopole based on Minkowski fractal”**, In: International Microwave and Optoelectronics Conference, 2013, Rio de Janeiro.
- [36] DHAR, S., GHATAK, R., GUPTA, B., PODDAR, D.R., **A Wideband Minkowski Fractal Dielectric Resonator Antenna**, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 61, p. 2895 - 2903, Março de 2013.
- [37] KARMAKAR, A., BANERJEE, U., GHATAK, R., PODDAR, D. R., **Design and Analysis of Fractal Based UWB Monopole Antenna**, National Conference on Communications (NCC), 2013.
- [38] KUMAR, R.A., CHOUKIKER, Y.K., BEHERA, S.K., **Design of hybrid fractal antenna for UWB application**, International Conference on Computing, Electronics and Electrical Technologies (ICCEET), 2012, Índia.
- [39] POURAHMADAZAR, J., GHOBADI, C., NOURINIA, J., **Novel Modified Pythagorean Tree Fractal Monopole Antennas for UWB Applications**, IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, Vol. 10, p. 484 – 487, Maio de 2011.
- [40] BISWAS, B., PODDAR, D. R., GHATAK, R., KARMAKAR, A., **Modified Sierpinski carpet fractal shaped slotted UWB monopole antenna with band notch characteristic**, National Conference on Communications (NCC), 2013, Índia.
- [41] ORAIZI, H., HEDAYATI, S., **A Novel Wide Slot Antenna Design using the Giuseppe Peano Fractal Geometry**, 20th Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE2012), 2012, Irã.
- [42] RAJ KUMAR, P. MALATHI AND J. P. SHINDE, **Design of Miniaturized Fractal Antenna**, 37th European Microwave Conference, 2007.

- [43] OLIVEIRA, E. C. de O., *Antenas de Microfita com Patch Quase-fractal para Aplicações em Redes WPAN / WLAN*, **Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRN**, 2008, Dissertação de Mestrado. Disponível em: <http://repositorio.ufrn.br>.
- [44] CST - Microwave Studio, 2010; www.cst.com.