



Universidade Federal de Campina Grande
Centro de Engenharia Elétrica e Informática
Curso de Graduação em Engenharia Elétrica

Hannah Meireles Gouveia

Relatório de Estágio Supervisionado

Campina Grande, Paraíba

Outubro de 2016

Hannah Meireles Gouveia

Relatório de Estágio Supervisionado

*Relatório de Estágio Supervisionado apresentado à
Coordenação do Curso de Graduação em Engenharia
Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande
como parte dos requisitos necessários para a obtenção
do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.*

Local de Estágio: Laboratório de Radiometria (UFCG)

Orientador:

Professor Alexandre Jean René Serres

Campina Grande, Paraíba

Outubro de 2016

Hannah Meireles Gouveia

Relatório de Estágio Supervisionado

*Relatório de Estágio Supervisionado apresentado à
Coordenação do Curso de Graduação em Engenharia
Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande
como parte dos requisitos necessários para a obtenção
do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.*

Local de Estágio: Laboratório de Radiometria (UFCG)

Aprovado em ___ / ___ / _____

Professor Avaliador

Universidade Federal de Campina Grande

Convidado

Professor Alexandre Jean René Serres

Universidade Federal de Campina Grande

Orientador

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus, aos meus pais, Hélio e Hilda, pelo amor incondicional, aos meus amigos, que fizeram essa graduação menos árdua, ao professor Alexandre Serres, meu orientador, pela confiança e oportunidade de trabalhar no Laboratório de Radiometria. Agradeço em especial ao doutorando Paulo Fernandes, que me ajudou e orientou durante este estágio. E por fim, a todos os professores e funcionários desta instituição, que contribuíram, direta ou indiretamente, na minha formação acadêmica, meu muito obrigado.

Resumo

Este relatório apresenta as atividades da aluna Hannah Meireles Gouveia realizadas durante o Estágio Supervisionado no Laboratório de Radiometria do Departamento de Engenharia Elétrica (**DEE**), da Universidade Federal de Campina Grande (**UFCG**), sob orientação do professor Alexandre Jean René Serres e supervisão do professor Hélder Alves Pereira. O estágio teve como meta o estudo e desenvolvimento de uma antena de microfita flexível, a partir de um material laminado de poliamida, para atuar em 2.45GHz. O *software Ansoft Designer da ANSYS* foi usado para simulação. Depois de simular, a construção e as devidas medições da antena foram realizadas. O estudo e uso da geometria fractal também foi abordado no estágio como maneira de integrar os assuntos. Assim aplicações fractais de Minkowski foram feitas na antena em níveis diferentes e o resultado foi analisado.

Palavras-chave: *Ansoft Designer*, Antena de microfita, Antena flexível, Fractais de Minkowski, Geometria fractal, Poliamida.

Lista de Figuras

Figura 2.1: Antena patch retangular de microfita.....	14
Figura 2.2: Laminado flexível de poliamida.....	18
Figura 2.3 Iterações do fractal de Minkowski.....	19
Figura 3.1 Valores dos parâmetros para a antena simulada.....	22
Figura 3.2: Versão final da antena e suas dimensões.....	23
Figura 3.3: Parâmetro S11 (perda de retorno) da antena.	24
Figura 3.4: Densidade superficial de corrente de 11.25 A/m^2	24
Figura 3.5: Diagrama de irradiação com a estrutura da antena.....	25
Figura 3.6: Diagrama de irradiação direcional em 2,45 GHz.....	25
Figura 3.7: Ganho de 6,3 dBi.	26
Figura 3.8: Impedância sobre a Carta de Smith (1 – 5 GHz).	27
Figura 3.9: Aplicação de fractais de níveis diferentes.	28
Figura 3.10: Parâmetro S11 para a antena com a aplicação de fractais de níveis diferentes.	29
Figura 3.11: Processo de fabricação da antena: (a) adesivos impressos do <i>layout</i> ; (b) adesivo sobre a face de cobre do laminado; (c) corrosão da face de cobre por imersão em solução de perclorato de ferro; (d) antena com o conector e com adesivo de cobre para ser o plano de terra.	31
Figura 3.12: (a) VNA portátil de até 4 GHz; (b) VNA de até 8,5 GHz, ambos da <i>Agilent</i>	31
Figura 3.13: Medição das antenas no LabMet com auxílio do VNA de 8,5 GHz, cabo conector SMA e monitor para visualização.	32
Figura 3.14: Antenas <i>patch</i> flexíveis fabricadas: (a) sem e (b) com aplicação de fractais.....	33
Figura 3.15: S11 da antena <i>patch</i> flexível medido no VNA portátil.	34
Figura 3.16: Parâmetro S11 da antena <i>patch</i> flexível medido no VNA de 8,5 GHz.....	35
Figura 3.17: Parâmetro S11 da antena <i>patch</i> flexível com fractais medido no VNA de 8,5 GHz....	36

Lista de Tabelas

Tabela 2.1: Vantagens e Desvantagens de uma antena de microfita.....	14
Tabela 3.1: Dimensões da antena.....	22
Tabela 3.2: Resultados das simulações e medições.....	36
Tabela 3.3: Erro percentual entre os resultados simulados e medidos.	37

Lista de Siglas

BEM	<i>Boundary Elements Method</i>	Método dos Elementos de Fronteira
FEM	<i>Finite Elements Method</i>	Método dos Elementos Finitos
FDTD	<i>Finite Difference Time Domain</i>	Diferenças Finitas no Domínio no Tempo
GPS	<i>Global Positioning System</i>	Sistema de Posicionamento Global
MoM	<i>Method of Moments</i>	Método dos Momentos
RF	<i>Radio Frequency</i>	Rádio Frequência
RFID	<i>Radio Frequency Identification</i>	Identificação por rádiofrequência
VNA	<i>Vector Network Analyzer</i>	Analisador de Rede Vetorial
VSWR	<i>Voltage Standing Wave Ratio</i>	Relação de Tensão de Onda Estacionária
WiMAX	<i>Worldwide Interoperability for Microwave Access</i>	Interoperabilidade Mundial para Acesso de Micro-Ondas
WLAN	<i>Wireless Local Area Network</i>	Rede Local sem Fios

Sumário

1. Introdução.....	10
1.1 Local do Estágio.....	10
1.2 Objetivos do Estágio.....	11
2. Fundamentação Teórica.....	13
2.1 Antena Patch Flexível.....	13
2.2 Poliamida.....	17
2.3 Geometria Fractal.....	18
2.4 Software Ansoft Designer®.....	19
3. Desenvolvimento da Antena.....	21
3.1 Cálculo dos Parâmetros.....	21
3.2 Simulações.....	22
3.3 Medições da Antena Construída.....	29
3.4 Análise dos Resultados.....	33
4. Considerações Finais.....	38
5. Referências Bibliográficas.....	39

1. Introdução

O uso de aparelhos para comunicação já é uma realidade há vários anos. É algo que as pessoas usam e precisam no seu dia a dia. Uma parte importante na estrutura de tais aparelhos é a antena, um dispositivo elétrico que converte energia elétrica em ondas eletromagnéticas e vice-versa [1].

Agora o desafio é fazer com que uma antena não só cumpra seu papel, mas também seja pequena, leve e em certos casos, flexível. Para isso, buscam-se geometrias e materiais novos.

Sob esse contexto, é realizado aqui um estudo inicial sobre geometria fractal e materiais flexíveis, visando a aplicação em uma antena *patch* retangular. Para isso faz-se uso de ferramentas computacionais, como o *Software Ansoft Designer da ANSYS*, onde toda a parte de simulação foi feita, e ferramentas de medição de antenas físicas, como o analisador de rede vetorial (VNA – *Vector Network Analyzer*), onde pode-se obter os principais parâmetros de uma antena.

Este trabalho é dividido em 4 capítulos. No capítulo 2 encontra-se a fundamentação teórica necessária para o desenvolvimento do projeto. O capítulo 3 aborda todos os passos realizados na construção da antena, juntamente com as simulações e medições feitas. E por fim, o capítulo 4 apresenta as considerações finais desse estudo.

1.1 Local do Estágio

As atividades realizadas neste trabalho foram desenvolvidas no Laboratório de Radiometria, localizado no bloco CJ do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande. O laboratório possui recursos computacionais com computadores de até 64 Gb de RAM. Licenças de *softwares* comerciais de simulações eletromagnéticas para dispositivos de altas frequências, em 2D e 3D, foram adquiridas como o *Ansoft Designer* e o *HFSS* da ANSYS e o *Advanced*

Design System da *Agilent*. O laboratório possui bancada de medição de dispositivos de até 8,5 GHz.

Nesse laboratório são desenvolvidos projetos de pesquisa de alunos da graduação como também é usado para realizar atividades da pós-graduação com as seguintes linhas de pesquisa:

- Coleta de energia eletromagnética;
- Dispositivos de rádio frequência;
- Metamateriais;
- Modelagem computacional de efeitos eletromagnéticos e,
- RFID e sensoriamento.

O estágio, propriamente dito, foi realizado no período de 27 de julho de 2016 a 30 de setembro de 2016, com carga horária de 180 horas, atendendo aos requisitos previstos na Resolução No 01/2012 do Colegiado do Curso de Graduação de Engenharia Elétrica em consonância com a Lei do Estágio (Lei No 11.788/2008).

1.2 Objetivos do Estágio

As atividades realizadas durante o estágio tiveram como finalidade o estudo e desenvolvimento de uma antena *patch* flexível usando um material dielétrico chamado poliamida, aplicando uma geometria fractal para observar como a antena se comporta.

O estágio foi dividido em etapas, seguindo o plano de estágio abaixo:

- Revisão bibliográfica;
- Estudo da teoria de antenas *patch* de microfita e geometria fractal;
- Simulações no *software Ansoft Designer* da antena desenvolvida;
- Aplicação de geometrias fractais na antena e verificação do seu comportamento;
- Fabricação da antena física;
- Medições dos parâmetros da antena física;
- Análise e comparação dos resultados obtidos a partir da antena física e da simulada;

- Redação do relatório de atividades de estágio;
- Confeção da apresentação do estágio;
- Defesa do estágio.

2. Fundamentação Teórica

Este capítulo é dividido em quatro seções, as quais apresentam considerações sobre antena *patch* flexível, a poliamida, uma introdução sobre geometria fractal, e sobre o *software Ansoft Designer*.

2.1 Antena Patch Flexível

Nos anos recentes, antenas *patch* flexíveis fizeram grande avanço na área de comunicações devido às várias vantagens provenientes do seu *design*, isto é, seu tamanho, formato e facilidade de fabricação.

Antenas convencionais são normalmente bem rígidas na sua estrutura e difíceis de implementar em lugares que possuam pouco espaço e ainda, seu custo pode não ser muito viável dependendo do processo de sua fabricação. A complexidade aumenta em função da exigência do material e do *design* da antena. Assim, é fácil imaginar que se dificulta bastante a implementação de uma antena rígida em um dispositivo moderno, que tende a diminuir seu tamanho a cada ano [1].

No caso deste estágio, o tipo de antena *patch* usada foi uma antena *patch* retangular de microfita. Esse tipo de antena tem um *design* bem simples e é mostrado na Figura 2.1 [2].

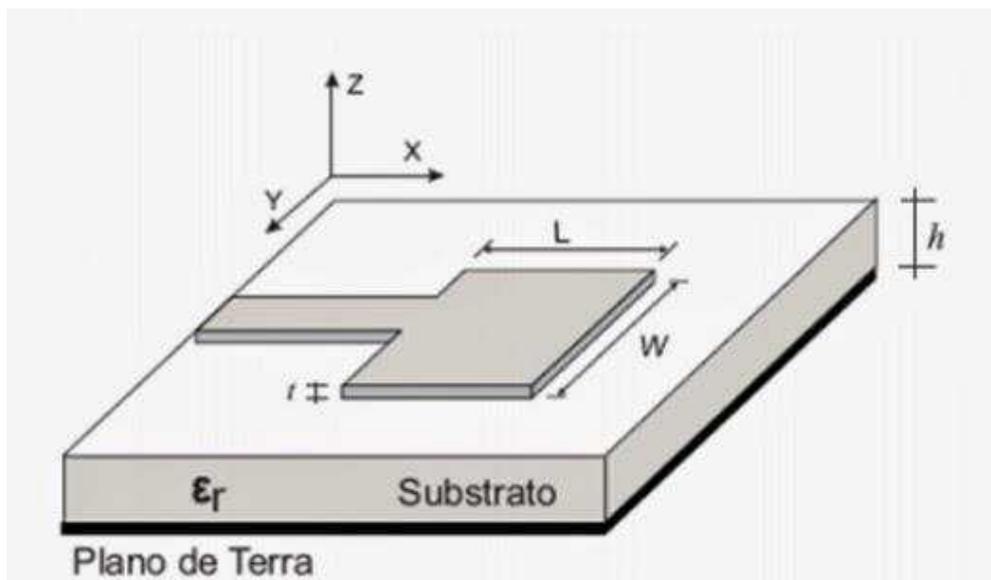


Figura 2.1: Antena *patch* retangular de microfita.

O substrato é um dielétrico, como fibra de vidro, borracha, poliamida, etc. O plano de terra deve ser de um material condutor, como cobre, prata ou alumínio. O *patch* fica em cima do substrato, em um tamanho menor e é alimentado por uma linha de microfita. Pode ser de diferentes formatos, circulares, retangulares, elípticos, depende da aplicação [1].

Para haver o casamento de impedância em estruturas com impedâncias diferentes, é comum usar um transformador de quarto de onda, é utilizado basicamente como seção intermediária para prover o casamento necessário. O objetivo é obter o casamento esperado, na banda de operação desejada, com o transformador de menor tamanho e também de menor custo [3].

A Tabela 2.1 apresenta algumas das vantagens e desvantagens das antenas de microfita:

Tabela 2.1: Vantagens e Desvantagens de uma antena de microfita.

VANTAGENS	DESvantagens
Leve	Largura de banda estreita
Baixo custo de fabricação, assim pode ser manufaturada em grande escala	Baixo ganho
Suporta polarização linear e circular	Baixa eficiência

Facilmente integrada a circuitos integrados de micro-ondas (MICs)	Possibilidade do surgimento de ondas de superfície
Capaz de operar em múltiplos da primeira frequência de ressonância	Baixa capacidade de manuseio do ganho

Analisando as vantagens e desvantagens de uma antena de microfita, é possível observar que as vantagens se sobressaem devido ao fato de que a maioria dos sistemas atuais exigem tamanhos reduzidos, pouco peso e baixo custo. Por isso o uso de antenas de microfita cresceu exponencialmente nos últimos anos. Exemplos de aplicação da tecnologia de microfita são [4]:

- Antenas de comunicação em mísseis;
- Sistemas de imagens de satélites;
- Comunicação de satélites;
- Antenas para celulares;
- WLAN e WIMAX;
- GPS.

Para o cálculo dos parâmetros de uma antena de microfita o método de linha de transmissão possui a modelagem mais simples dos métodos e promove uma boa percepção física do procedimento mas com baixa precisão. Este método considera os efeitos de borda causados pelo fato do *patch* possuir dimensões finitas, levando a um efeito de franjamento tanto ao longo do comprimento quanto da largura do *patch*.

A quantidade de franjamento é em função das dimensões do *patch* e do substrato. No plano XY (plano E principal) o franjamento varia em função do comprimento (L) do *patch*, da espessura do substrato (t) e de sua permissividade relativa (ϵ_r) vistos na Figura 2.1 [5].

De acordo com [6], as equações para a determinação dos parâmetros de uma antena *patch* de microfita, usando o método da linha de transmissão são dadas por:

A largura W do elemento radiador:

$$W = \frac{1}{2f_r\sqrt{\mu_0\varepsilon_0}}\sqrt{\frac{2}{\varepsilon_r + 1}} = \frac{v_0}{2f_r}\sqrt{\frac{2}{\varepsilon_r + 1}} \quad (2.1)$$

Onde W é a largura do *patch*, f_r é a frequência de ressonância, μ_0 é a permeabilidade magnética do vácuo, ε_0 é a permissividade do vácuo, ε_r é a permissividade relativa e v_0 é a velocidade das ondas eletromagnéticas no espaço livre.

A constante dielétrica efetiva da antena:

$$\varepsilon_{ref} = \frac{\varepsilon_r + 1}{2} + \frac{\varepsilon_r - 1}{2} = \left(1 + 12\frac{t}{W}\right)^{-1/2} \quad (2.2)$$

Onde ε_{ref} é a constante dielétrica efetiva e t é a espessura do substrato.

Depois da determinação do valor de W , o tamanho do comprimento gerado pelos campos de borda é determinado:

$$\frac{\Delta L}{t} = 0.412 \frac{(\varepsilon_{ref} + 0.3)\left(\frac{W}{t} + 0.264\right)}{(\varepsilon_{ref} - 0.258)\left(\frac{W}{t} + 0.8\right)} \quad (2.3)$$

Onde ΔL é a variação de comprimento da antena.

O valor do comprimento real da antena é dado por:

$$L = \frac{1}{2f_r\sqrt{\varepsilon_{ref}}\sqrt{\mu_0\varepsilon_0}} - 2\Delta L \quad (2.4)$$

Onde L é o comprimento do *patch*.

Já o comprimento efetivo da antena L_{ef} é:

$$L_{ef} = L + 2\Delta L \quad (2.5)$$

E a frequência de ressonância é dada por:

$$f_r = \frac{v_0}{2L\sqrt{\epsilon_r}} \quad (2.6)$$

Existem outros métodos que podem ser usados para a determinação dos parâmetros de uma antena de microfita, como os métodos de onda completa [5], que não serão abordados neste relatório.

2.2 Poliamida

A poliamida está na categoria de material termoplástico. Ela é constituída por monômeros de amida conectados por ligações peptídicas, com outros possíveis agrupamentos. A primeira poliamida foi sintetizada na *DuPont*, em 1935. As poliamidas começaram a ser usadas como fibras sintéticas, como o nylon e aramidas, só posteriormente passaram para a manufatura tradicional dos plásticos, tendo nos dias atuais uma gama de utilidades [7].

Este material é amplamente utilizado na fabricação de circuitos impressos flexíveis, principalmente circuitos que trabalham com temperatura mais elevada, como por exemplo, fitas de *led* de uso profissional [8]. No caso deste projeto, é utilizado um laminado flexível onde uma face é de poliamida e a outra de cobre, como mostrado na Figura 2.2:



Figura 2.2: Laminado flexível de poliamida.

As especificações técnicas do laminado flexível são [8]:

- Espessura do cobre: 35 microns
- Espessura da poliamida: 50 microns
- Face cobreada: 01 (face simples)
- Permissividade $\epsilon_r = 4$
- Tangente de perdas = 0,04

2.3 Geometria Fractal

O termo fractal foi usado pela primeira vez por Benoit Mandelbrot, em 1975. Mandelbrot foi o responsável pelo desenvolvimento dessa geometria da natureza e implementou o seu uso em diversas aplicações. O termo vem do latino *fractus*, do verbo *frangere*, que significa quebrar e foi usado para denominação da classe especial de curvas definidas recursivamente que produzem imagens reais e surreais [9]. Os fractais são usualmente empregados no estudo de objetos naturais, como folhas, flocos de neves, montanhas, ondas, etc. As geometrias fractais mais populares são Minkowski, Sierpinski, curva de Hilbert e Koch [10].

Projetos como envio de dados ou uso de uma mesma antena para diversos canais, sendo utilizada em dispositivos de comunicações móveis, exigem que a antena opere em múltiplas bandas. A incorporação de geometria fractal em antenas *patch* de microfita é uma ótima proposta para alcançar uma resposta em bandas múltiplas [11].

Uma antena fractal oferece várias vantagens como tamanho compacto, compatibilidade de impedância, alta diretividade e respostas em bandas múltiplas e bandas largas [12].

Como parte do estágio, o fractal de Minkowski foi escolhido para ser aplicado na antena desenvolvida e verificar sua influência na resposta da antena. Na Figura 2.3 é mostrado o fractal de Minkowski utilizado [13].

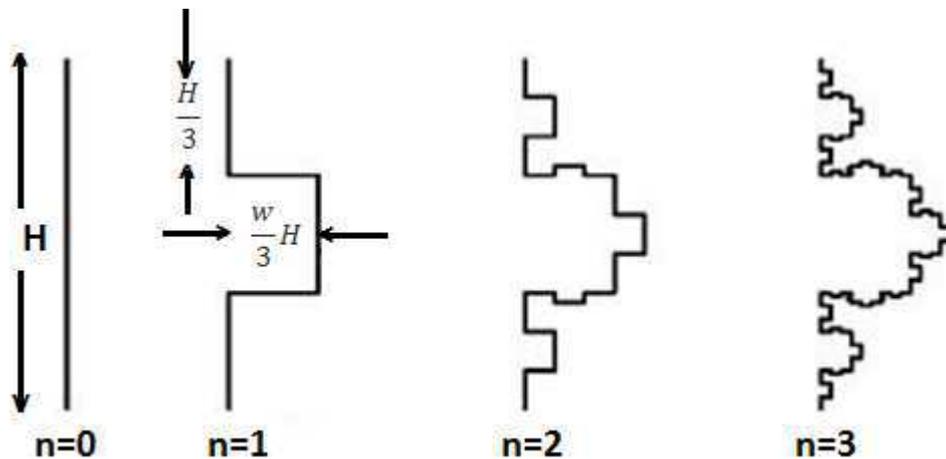


Figura 2.3 Iterações do fractal de Minkowski.

2.4 *Software Ansoft Designer®*

O *Ansoft Designer* integra simulação de circuitos e simulação de campos eletromagnéticos, para uma simulação 3D usa-se o HFSS, que faz parte do pacote do *Ansoft Designer*. Este *software* permite que engenheiros criem, otimizem e validem componentes, circuitos e sistemas antes que um protótipo seja construído fisicamente. Essa característica é fundamental no desenvolvimento de antenas, já que a simulação é uma forma rápida, direta e sem gastos com manufatura para testar o funcionamento da antena [14].

Como ferramenta computacional, o *Ansoft Designer*, usa um processo de modelagem da interação dos campos elétricos e magnéticos com objetos físicos e o meio que eles estão. Assim, é necessário utilizar métodos de aproximação para realizar as simulações. As equações de Maxwell, que são a base do eletromagnetismo, são usadas para o cálculo do desempenho de antenas, testar a compatibilidade eletromagnética de dispositivos, verificar a propagação de ondas eletromagnéticas e etc. Como forma para discretizar o espaço e resolver as equações de Maxwell em cada ponto deste espaço discretizado existem técnicas.

Estas técnicas são métodos como o método dos elementos finitos (FEM – *Finite Elements Method*), o método diferencial finito no domínio do tempo (FDTD – *Finite Differential Time Domain*) e o método dos momentos (MoM – *Method of Moments*), também conhecido como método dos elementos de fronteira (BEM – *Boundary Elements Method*). A escolha do método adequado para a simulação desejada deve levar em conta a precisão dos resultados, o tempo de simulação e a capacidade do computador.

O *Ansoft Designer* usa o método dos momentos. Ele é um método numérico computacional que resolve equações diferenciais parciais que são formuladas como integrais. O MoM funciona construindo malhas sobre a superfície modelada. Apesar do MoM se apresentar menos eficiente que os métodos FEM e FDTD, ele apresenta um tempo de simulação menor em comparação com os outros [15].

Para a simulação, as configurações que devem ser feitas são [16]:

- *Design* planar eletromagnético;
- Modelo utilizado (camadas e materiais);
- Excitação (casamento de impedância e portas);
- Análise (faixa de frequência, malhas, quantidade de pontos);
- *Plot* dos resultados.

Depois de abordar a fundamentação teórica, que serve como base ao entendimento do que foi realizado no estágio relatado neste trabalho, o próximo capítulo apresentará o desenvolvimento da antena *patch* flexível e os resultados obtidos.

3. Desenvolvimento da Antena

Neste capítulo será mostrado todo o desenvolvimento da antena flexível de microfita, bem como os parâmetros, os cálculos e as simulações. Os resultados da medição da antena construída também são discutidos neste capítulo.

3.1 Cálculo dos Parâmetros

Para o desenvolvimento da antena, o primeiro passo é calcular seus parâmetros, que são:

ϵ_r : Permissividade relativa do substrato.

$\text{Tan}\delta$: Tangente de perda do substrato. Esse parâmetro é usado para o cálculo da perda. Quanto maior o valor, maior a perda.

ρ : Resistividade relativa do condutor. Para cobre, usa-se o valor 1.

Height: Altura do substrato.

Thickness: Espessura do condutor de microfita. Pode ser escolhido o valor zero, porém, o cálculo da perda não será incluído nas perdas do condutor.

Frequency: Frequência na qual a linha de transmissão da microfita será analisada.

A partir desses parâmetros e utilizando a calculadora para antenas de microfita, disponível no site do Microwave 101 [17], foram encontrados os valores para a simulação da antena. É visto na Figura 3.1 os valores dos parâmetros.

ϵ_r : 4 $\tan\delta$: 0.04 ρ : 1
 Height: 0.05 mm Thickness: 0.035 mm Frequency: 2.45 GHz

Analysis/Synthesis Values

Width: 0.08173 mm Z_0 : 50 Ω
 Length: 18.42512 mm Angle: 90 deg.
 Analyze Synthesize
 ϵ_{eff} : 2.879 Loss: 0.364 dB

Figura 3.1 Valores dos parâmetros para a antena simulada.

3.2 Simulações

Com os parâmetros já calculados, a simulação, realizada usando o *software Ansoft Designer*, foi feita várias vezes a partir dos valores da Figura 3.1 e alterando as dimensões da estrutura do *patch*, do transformador de um quarto de onda e da linha de 50 Ω para que a estrutura esteja casada em 50 Ω na frequência de 2,45 GHz. A Figura 3.2 apresenta a versão otimizada da antena e a Tabela 3.1 as dimensões finais.

Tabela 3.1: Dimensões da antena.

	Altura (H)	Comprimento (W)
<i>Patch</i>	30.1 mm	30.1 mm
Transformador de $\lambda/4$	6 mm	1.9 mm
Linha de 50 Ω	6 mm	1 mm

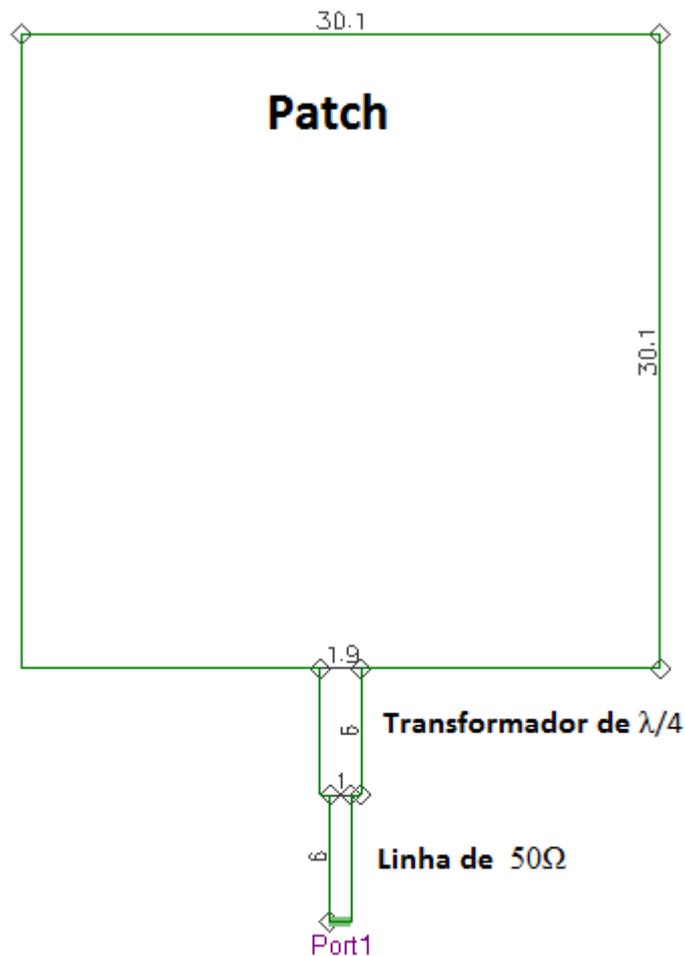


Figura 3.2: Versão final da antena e suas dimensões.

O *return loss*, ou perda de retorno é a razão entre a onda refletida pela antena P_{out} e a onda transmitida para a antena P_{in} , normalmente expressada em um número negativo em dB [18].

$$RL = 10 \log_{10}(P_{out}/P_{in}) \quad (3.1)$$

Também conhecido como o parâmetro S_{11} , um *return loss* de 0 dB implica que toda a potência é refletida pela antena e nada é irradiada. Idealmente antenas são feitas para ter poucas perdas, então a maior parte da potência entregue a antena deve ser irradiada [18].

Na Figura 3.3, o *return loss* da antena é mostrado. É possível observar que a antena irradia melhor na frequência 2,45 GHz, para a qual ela foi desenvolvida, onde $S_{11} = -33,2268$ dB. Isso mostra que a antena apresenta uma perda muito pequena.

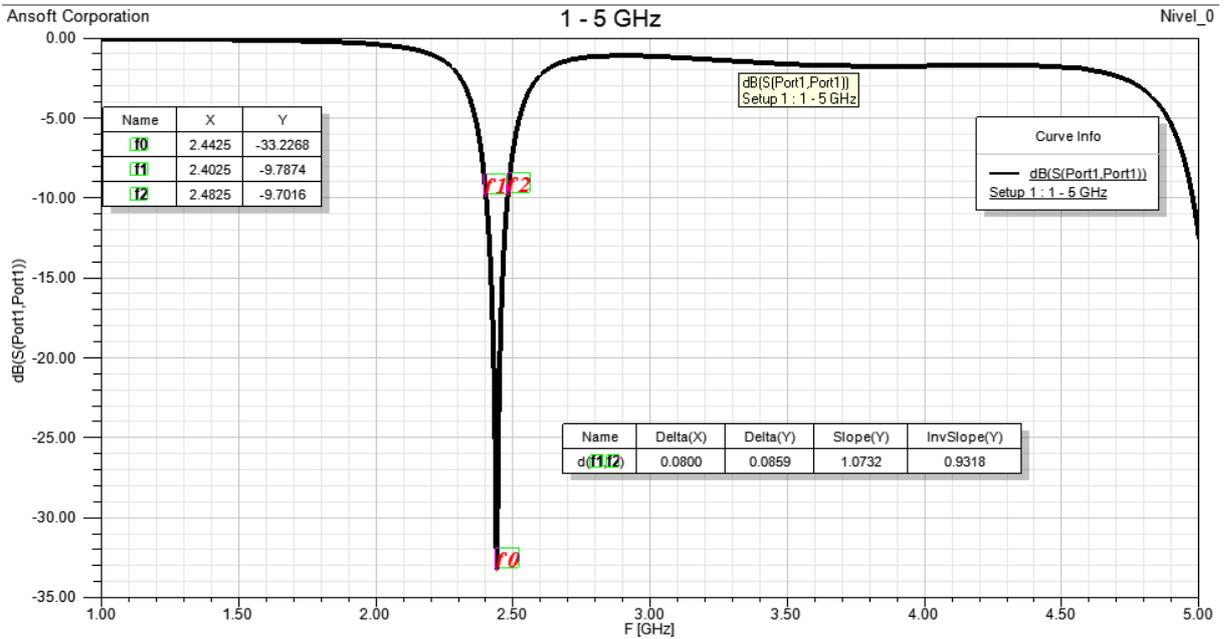


Figura 3.3: Parâmetro S11 (perda de retorno) da antena.

Outro parâmetro analisado é a densidade superficial de corrente, que flue pela estrutura irradiante por ação da excitação aplicada. Esse fluir de corrente elétrica com densidade superficial J implica na ocorrência de cargas elétricas se movimentando no interior da estrutura e como consequência um campo magnético H é gerado [19]. A densidade de corrente J é mostrado na Figura 3.4.

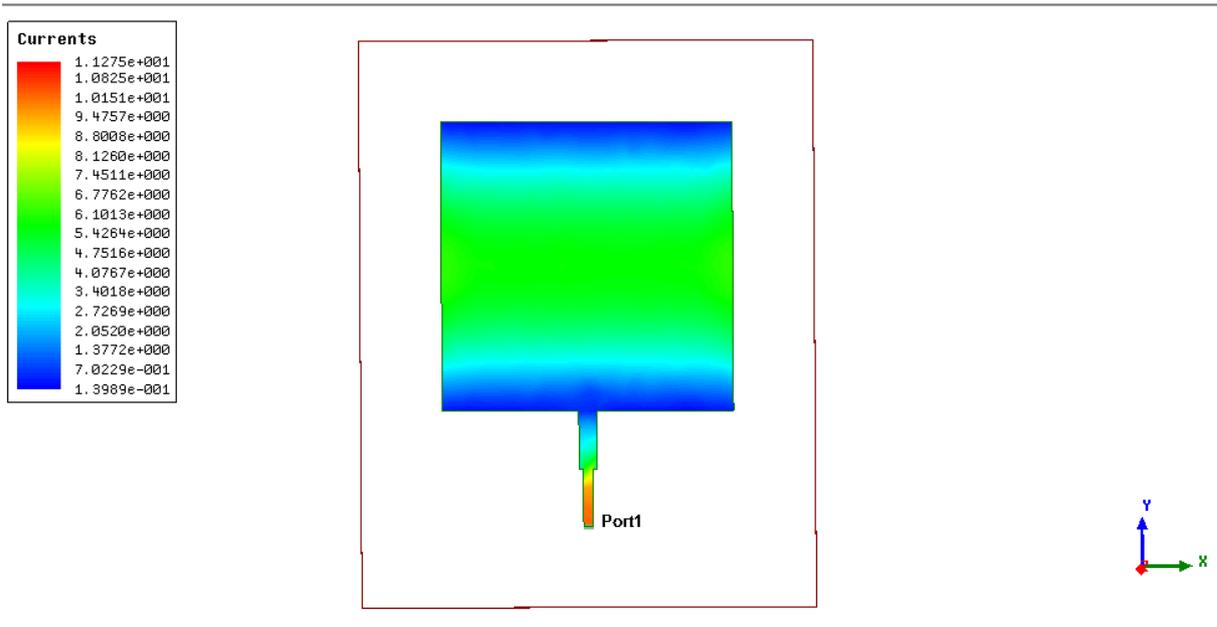


Figura 3.4: Densidade superficial de corrente de 11.25 A/m².

O diagrama de irradiação é a representação gráfica do ganho de uma antena em um determinado plano [20]. A irradiação observada na Figura 3.5 ocorre na direção z.

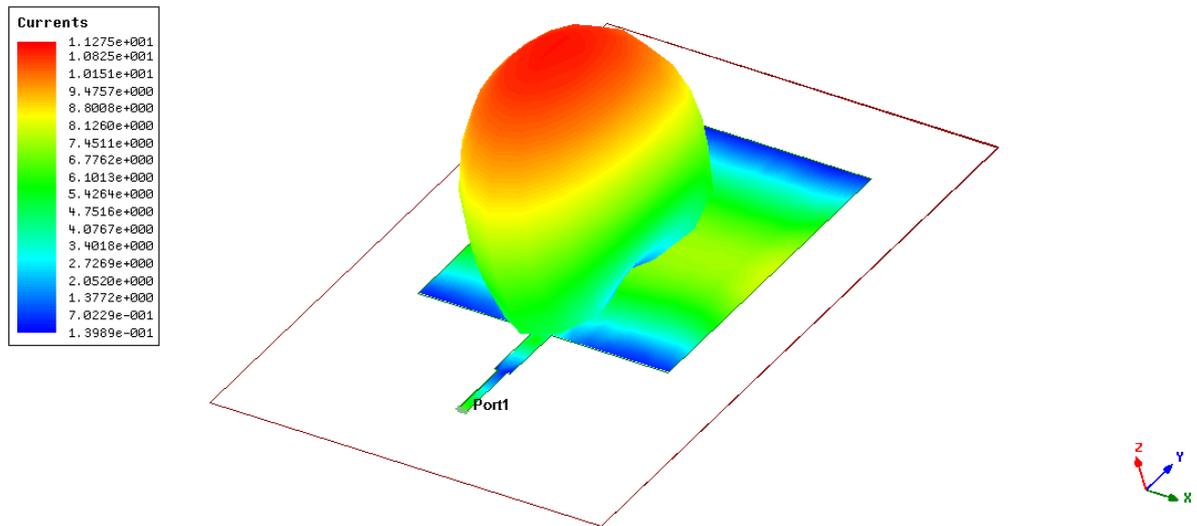


Figura 3.5: Diagrama de irradiação com a estrutura da antena.

Como essa antena é direcional, já que ela recebe ondas eletromagnéticas mais eficientemente em uma direção [20] seu diagrama de irradiação direcional também é plotado e mostrada na Figura 3.6.

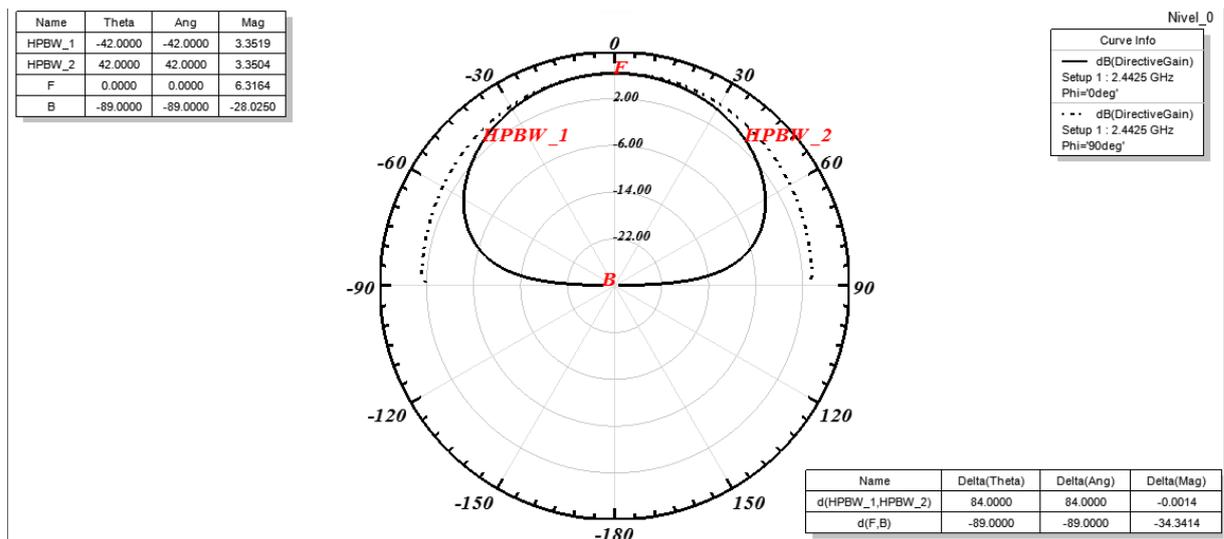


Figura 3.6: Diagrama de irradiação direcional em 2,45 GHz.

A diretividade é outro parâmetro de uma antena. Ela indica a capacidade da antena de direcionar a potência irradiada [20]. A diretividade corresponde ao ganho

diretivo máximo, no caso da antena desenvolvida um ganho de 6,3 dBi, visto na Figura 3.7.

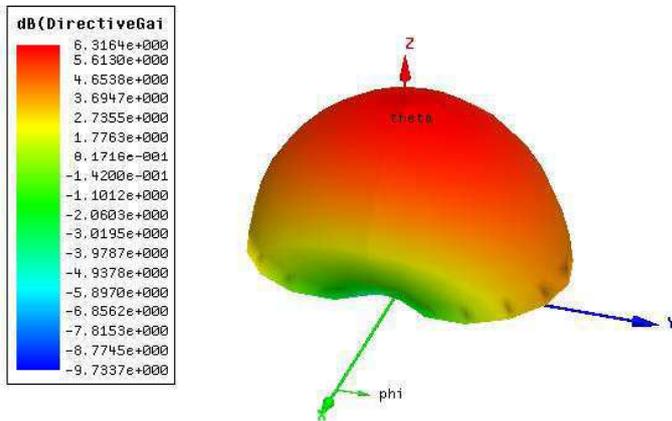


Figura 3.7: Ganho de 6,3 dBi.

A carta de Smith ou *Smith Chart* é uma ferramenta utilizada para a visualização da impedância de uma antena como uma função de frequência. Na carta de Smith são observados três pontos notáveis: o ponto onde a curva intercepta o eixo real, onde a reatância vale zero, o ponto mais próximo ao centro da carta, que é a indicação do melhor casamento, e o ponto de máxima resistência [21]. A Figura 3.8 mostra a carta de Smith e a razão da tensão de onda estacionária (VSWR - *Voltage Standing Wave Ratio*) para a antena desenvolvida.

O VSWR é uma taxa de amplitude máxima sobre a amplitude mínima de tensão. Diz-se que um VSWR muito grande é ruim pois a potência efetivamente irradiada é bem menor que a que deveria ser e quanto maior o *return loss* menor será o VSWR, assim como mostrado na Figura 3.8, um VSWR < 2 é um valor aceitável para a antena [22].

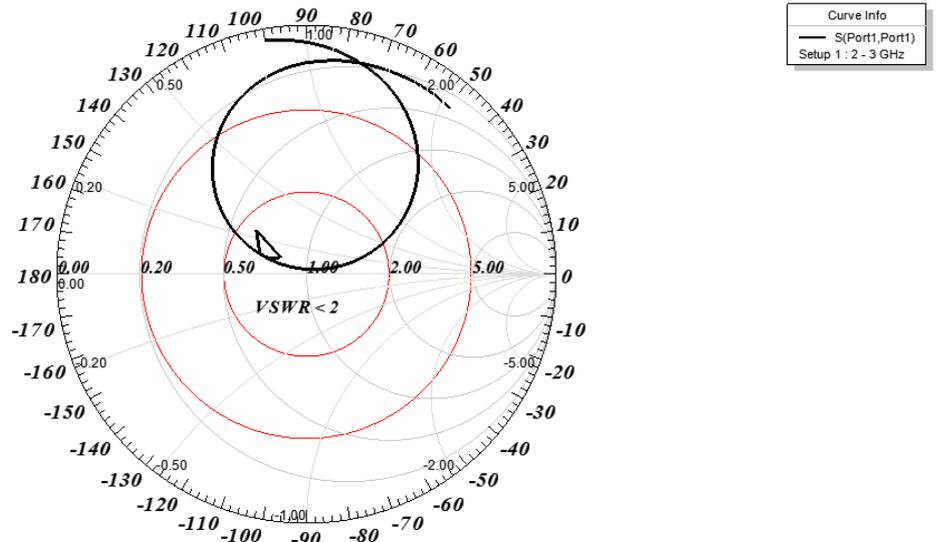


Figura 3.8: Impedância sobre a Carta de Smith (1 – 5 GHz).

Depois de concluir com sucesso as simulações para a antena *patch* flexível para a frequência de 2,45 GHz. O próximo passo foi verificar como a aplicação de fractais de diferentes níveis influencia o funcionamento da antena. Na Figura 3.9, observa-se os diferentes níveis dos fractais de Minkowski, que foram calculados e construídos com base na Figura 2.3:

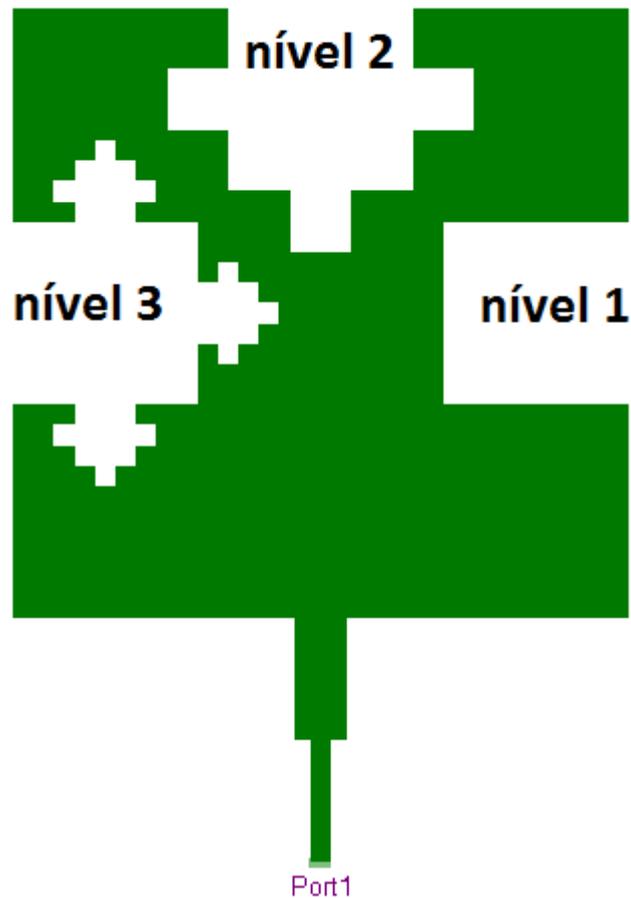


Figura 3.9: Aplicação de fractais de níveis diferentes.

A aplicação de fractais neste trabalho foi um complemento do estudo da geometria fractal em antenas *patch*. Foi visto que uma das características da aplicação de fractais é a capacidade de miniaturizar uma antena *patch* retangular convencional ou aumentar a faixa de frequência da antena sem mexer no seu tamanho. No caso deste trabalho, pode-se comprovar essa característica, já que suas frequências ressonantes tiveram um aumento, visto na Figura 3.10.

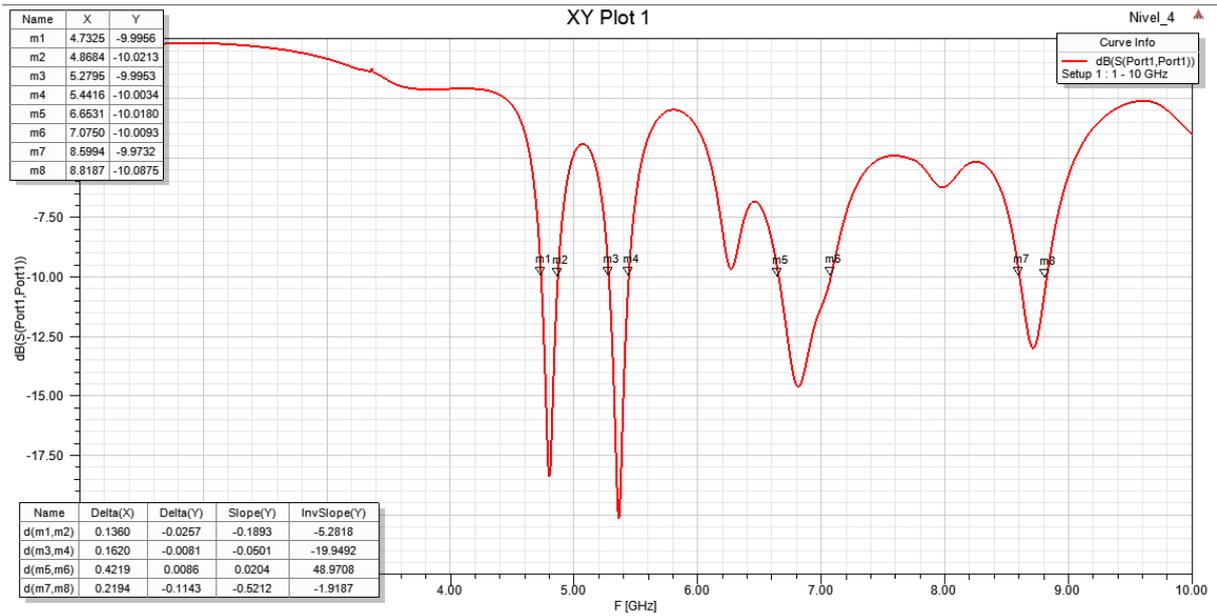


Figura 3.10: Parâmetro S11 para a antena com aplicação de fractais de níveis diferentes.

3.3 Medições da Antena Construída

O processo de fabricação da antena *patch* flexível se deu a partir das seguintes etapas descritas:

1. Elaboração do *layout* da antena utilizando o *software CorelDraw*. Após as simulações, o modelo da antena foi exportado do *Ansoft Designer* para o HFSS e do HFSS para o *CorelDraw*, onde réplicas foram feitas para garantir uma margem em caso de erro na hora de confeccionar o adesivo;
2. Confeção dos adesivos respectivos aos *layouts* de impressão em uma gráfica especializada. Embora se use máquinas de cortes de precisão, por ser uma estrutura de dimensões pequenas, a agulha usada não é fina o suficiente para garantir um corte perfeito (Figura 3.11(a));
3. Colagem do adesivo no material laminado de poliamida. Como já mencionado na seção 2.2, esse material apresenta uma face de cobre e uma face de poliamida. Para deixar a poliamida como substrato e o cobre como o *patch*, coloca-se o adesivo na face de cobre. Pela técnica de derretimento do cobre, o adesivo impede que a parte do cobre em que ele está colado não derreta, mantendo seu desenho em cobre (Figura 3.11(b));

4. Corrosão da face de cobre por imersão da antena em solução de perclorato de ferro. O perclorato de ferro pode ser comprado em lojas de dispositivos eletrônicos e vem na forma de pó, onde deve ser diluído em $\frac{1}{2}$ litro de água para um pacote. Após a mistura do perclorato de ferro, sua temperatura aumenta bastante por causa da reação com a água. Colocando a antena na solução, leva em torno de 5 minutos para o cobre ser completamente derretido. Passa água para limpar a antena, enxuga e cola na face traseira um adesivo de dupla face de cobre para ser o plano de terra da antena (Figura 3.11(c));
5. Por último na construção da antena, retira-se o adesivo para encaixar o conector que será usado para realizar a medição. Encaixa-se o conector em contato com a alimentação da antena (Figura 3.11(d));

A Figura 3.11 ilustra o processo de fabricação da antena.

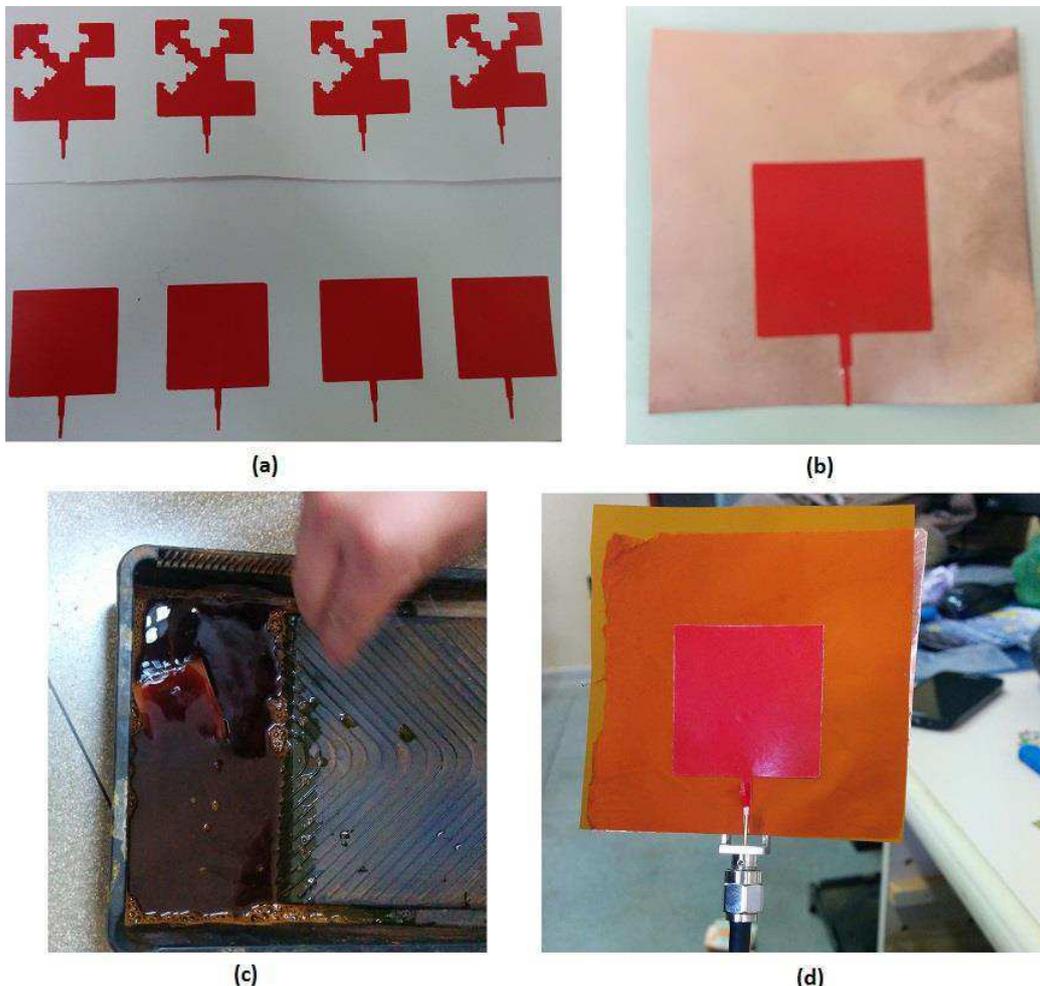


Figura 3.11: Processo de fabricação da antena: (a) adesivos impressos do *layout*; (b) adesivo sobre a face de cobre do laminado; (c) corrosão da face de cobre por imersão em solução de perclorato de ferro; (d) antena com o conector e com adesivo de cobre para ser o plano de terra.

Com a antena pronta, o próximo passo foi fazer sua medição. O analisador de rede VNA portátil da *Agilent* que possui faixa de frequência até 4 GHz e disponível no Laboratório de Radiometria, pode ser visto na Figura 3.12(a).

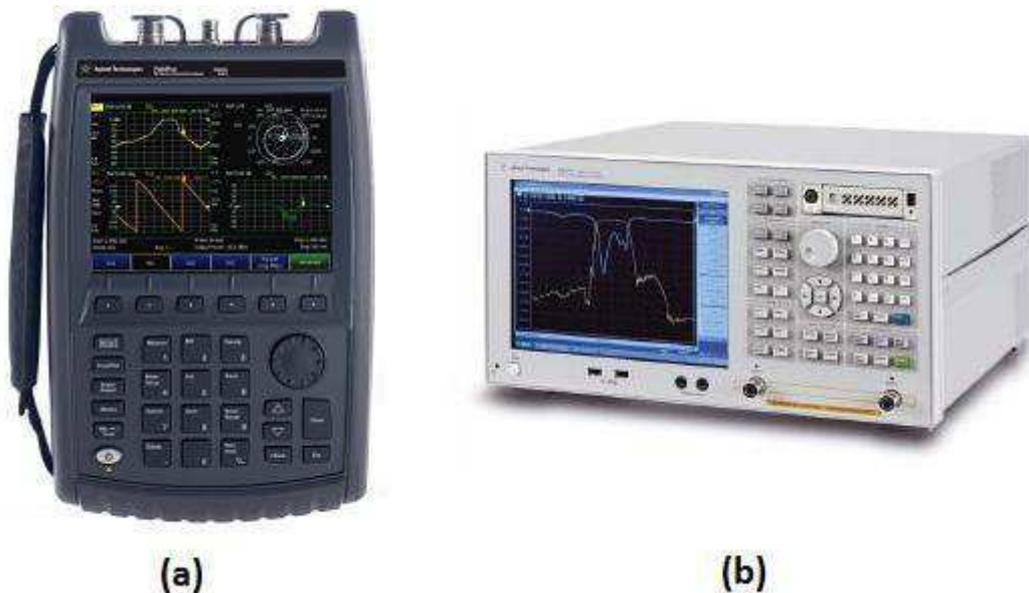


Figura 3.12: (a) VNA portátil de até 4 GHz; (b) VNA de até 8,5 GHz, ambos da *Agilent*.

Com o analisador ligado, a antena foi conectada com o auxílio de um cabo conector SMA, usado para frequências de até 2,5 GHz. O parâmetro S11 foi medido e capturado da tela do analisador. Os resultados estão na seção 3.4.

Para a confecção da antena com aplicação de fractais foi realizado exatamente o mesmo passo a passo já descrito. Porém sua medição foi realizada no ambiente de medição do Laboratório de Radiometria localizado no Laboratório de Metrologia (LabMet) onde o analisador de rede usado tem uma faixa de frequência maior, até 8,5 GHz (Figura 3.12(b)), já que pelos resultados simulados (ver Figura 3.10) a faixa de frequência atuante da antena *patch* com fractais é maior do que 4 GHz, assim impossibilitando a medição correta se fosse utilizado o VNA portátil. O mesmo cabo conector SMA foi usada e o parâmetro S11 da antena foi medido e capturado.

Na Figura 3.13, apresenta-se a medição utilizando o VNA de até 8,5 GHz, com o auxílio de um aluno de doutorado para mostrar os resultados e, na Figura 3.14, pode-se ver as duas antenas fabricada.

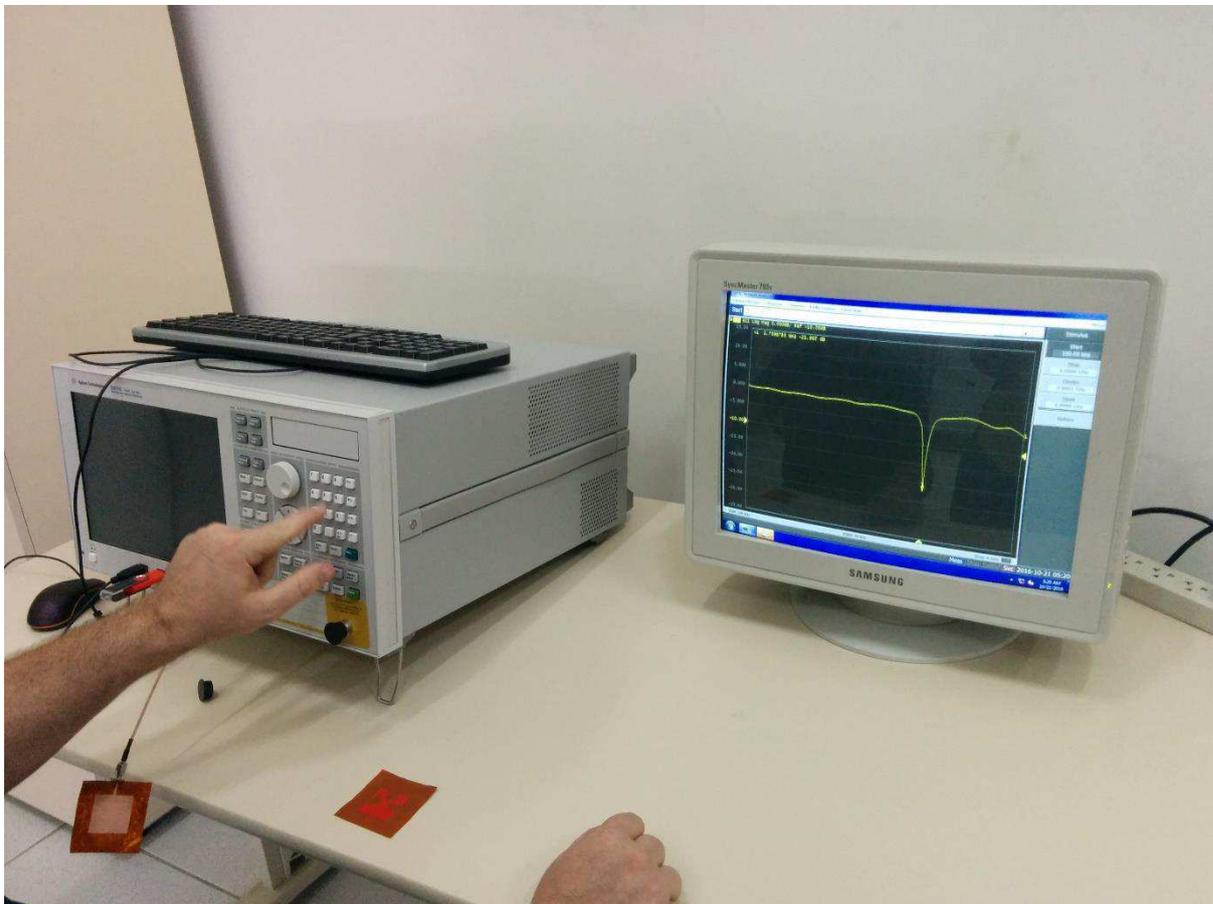


Figura 3.13: Medição das antenas no LabMet com auxílio do VNA de 8,5 GHz, cabo conector SMA e monitor para visualização.

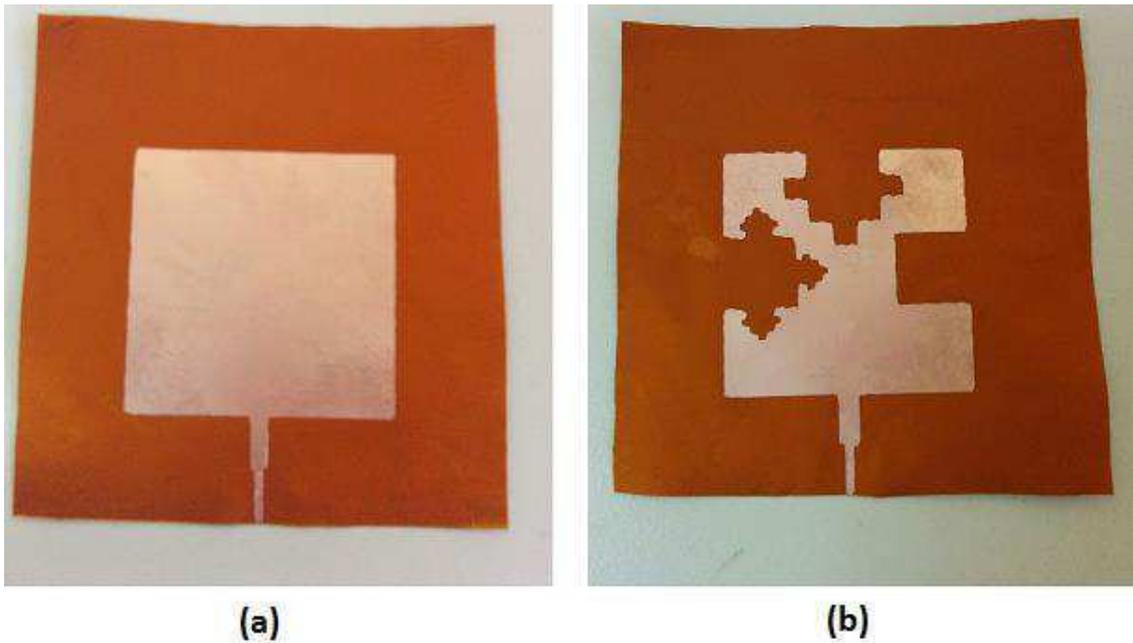


Figura 3.14: Antenas *patch* flexíveis fabricadas: (a) sem e (b) com aplicação de fractais.

3.4 Análise dos Resultados

Nesta seção serão discutidos os resultados obtidos a partir das medições das antenas fabricadas mencionadas na seção 3.3. A primeira medição feita foi para a antena da Figura 3.14(a). A partir do resultado da simulação realizada no *software Ansoft Designer* (Figura 3.3) verificou-se que a antena foi construída para atuar em 2,44 GHz. Observando o gráfico salvo da tela do VNA portátil presente na Figura 3.15, é possível observar que a frequência de ressonância está em 2,77 GHz e sua perda de retorno (parâmetro S11) é de -18,59 dB.

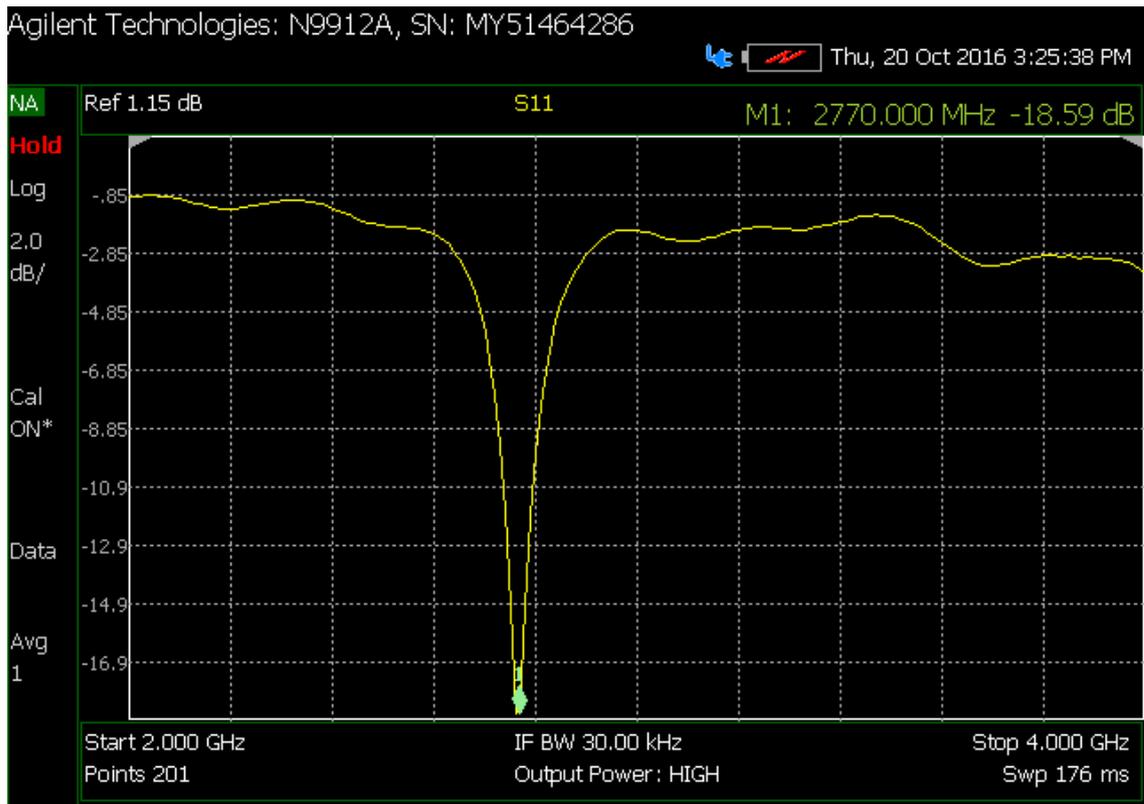


Figura 3.15: S11 da antena *patch* flexível medido no VNA portátil.

Depois, com a mesma antena, e com o VNA de até 8,5 GHz presente no LabMet, o parâmetro S11 foi medido para a faixa de frequência de 2,40 a 3 GHz. O resultado foi capturado diretamente do VNA e armazenado como .csv. Os valores obtidos foram transferidos para o Excel e o gráfico visto na Figura 3.16 foi plotado.

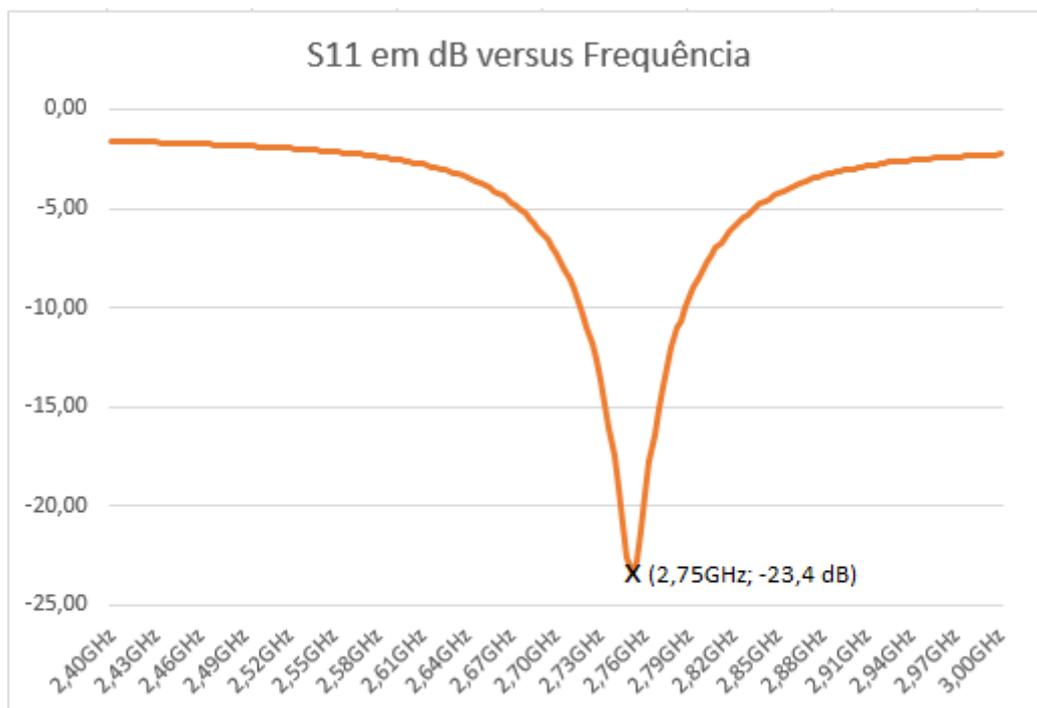


Figura 3.16: Parâmetro S11 da antena *patch* flexível medido no VNA de 8,5 GHz.

Analisando os dois gráficos do parâmetro S11 obtidos para a mesma antena, pode-se observar que os resultados diferiram do simulado. Esse resultado já era esperado pois a confecção da antena foi feita de forma artesanal, de maneira que sua estrutura não ficou perfeitamente igual à estrutura desenvolvida no *Ansoft Designer*. O uso do conector sem solda também prejudicou a medição.

Comparando os resultados das Figuras 3.15 e 3.16, nota-se que a medição no VNA portátil apresentou um resultado menos satisfatório.

Para a antena da Figura 3.14(b), com aplicações de fractais, foi medido seu parâmetro S11 apenas no VNA de 8,5 GHz. Da mesma forma, seu resultado foi salvo como arquivo .csv e então plotado usando o Excel, ele pode ser visto na Figura 3.17. Analisando os resultados obtidos na simulação e na medição, percebe-se uma discrepância ainda maior entre eles, isso pelo fato de além dos motivos já supracitados para a outra antena, a antena com fractais apresenta um desafio extra na sua confecção por ter um desenho que necessita de cortes precisos devido à sua geometria fractal.

Na tabela 3.2 estão reunidos os valores medidos e simulados.

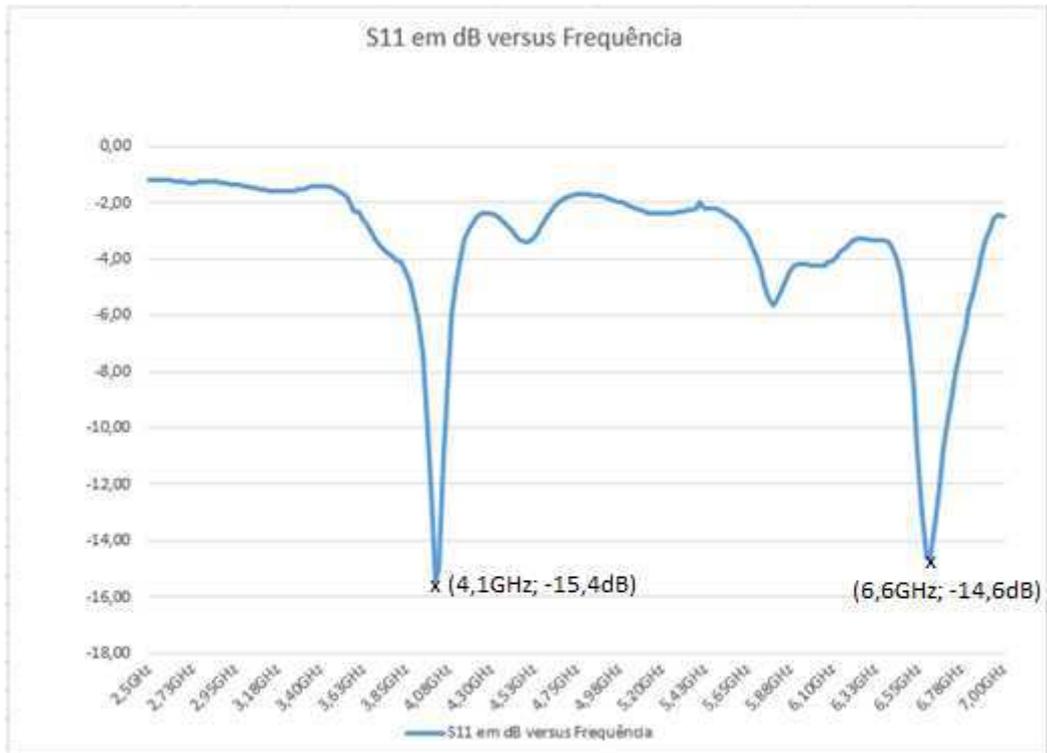


Figura 3.17: Parâmetro S11 da antena *patch* flexível com fractais medido no VNA de 8,5 GHz.

Tabela 3.2: Resultados das simulações e medições.

	Atenuação		Frequência de ressonância	
	Simulado	Medido	Simulado	Medido
<i>Antena Patch Flexível de 2,44GHz (VNA portátil)</i>	-33,22 dB	-18,59 dB	2,44 GHz	2,77 GHz
<i>Antena Patch Flexível de 2,44GHz (VNA de 8,5GHz)</i>		-23,4 dB		2,75 GHz
<i>Antena Patch Flexível com aplicações de fractais</i>	-16,5 dB	-15,4 dB	4,8 GHz	4,1 GHz
	-19,1 dB	dB	5,4 GHz	6,6 GHz
	-14,8 dB	-14,6 dB	6,8 GHz	

Tabela 3.3: Erro percentual entre os resultados simulados e medidos.

Erro (%)	Atenuação	Frequência de ressonância
<i>Antena Patch Flexível de 2,44GHz (VNA portátil)</i>	44%	13,5%
<i>Antena Patch Flexível de 2,44GHz (VNA de 8,5GHz)</i>	29,6%	12,7%
<i>Antena Patch Flexível com aplicações de fractais</i>	6,6%	14,6%
	23,6%	22,2%

4. Considerações Finais

O Estágio Supervisionado contribuiu decisivamente em minha formação acadêmica, visto que complementou uma parte importante do conhecimento adquirido ao longo da minha caminhada discente.

O estudo sobre antenas *patch* foi de imensa relevância, já que permitiu o contato com um equipamento moderno e disponível apenas em alguns ambientes acadêmicos e de pesquisa, visto seu alto valor comercial.

As simulações permitiram tanto o aprendizado sobre a estrutura trabalhada, como sobre a própria ferramenta computacional, o *Ansoft Designer*.

Analisando os resultados obtidos é possível afirmar que, mesmo com resultados diferentes entre simulação e medição, realizar a construção e a medição das antenas contribuiu para o aprendizado na prática de como confeccionar uma antena *patch* usando o método da corrosão de cobre pela solução de perclorato de ferro, válido para a aplicação em trabalhos futuros.

5. Referências Bibliográficas

- [1] MOKHA, Shivam; JANGIR, Shubham; PIMPLE, Shreyas; BANDHAOKAR, Sumeet. *Design of Flexible Microstrip Patch Antenna of 2.4 GHz Operation Frequency Using HFSS. International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*. Volume 3, número 5, 2016.
- [2] GALENO, Cláudio. Projeto Final Antenas e Propagação - Criação de uma Antena de Microfita Triangular. Disponível em: <<http://nightwireeng.blogspot.com.br/2013/11/projeto-final-antenas-e-propagacao.html>>. Acesso em: 27 de out de 2016.
- [3] Capítulo 2: Síntese de Transformadores de um quarto de onda. PUC-Rio. Disponível em: http://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/16456/16456_3.PDF. Acessado em 12/10/2016.
- [4] SRIVASTAVA, S.; MISHRA, P.; SINGH, RK. *Design of a reconfigurable antenna with fractal geometry. IEEE UP Section Conference on Electrical Computer and Electronics (UPCON)*, 2015.
- [5] SILVA, José Lucas. Estudo do Comportamento de Antena de Microfita com Substrato Metamaterial. Tese de Mestrado. UFERSA. 2015.
- [6] BALANIS, Constantine A. *Antenna Theory: Analysis and Design*, 3ª Edição. Wiley, 2005.
- [7] HERMES, Matthew. *Enough for One Lifetime, Wallace Carothers the Inventor of Nylon, Chemical Heritage Foundation*, 1996.
- [8] Laminado Cobreado Para Circuito Impresso Flexível Poliamida. Disponível em: <<http://produto.mercadolivre.com.br/MLB-695504993-laminado-cobreado-para-circuito-impresso-flexivel-poliamida- JM>>. Acesso em: 30 de Set de 2016.
- [9] ASSIS, Thiago A.; MIRANDA, José Garcia V.; MOTA, Fernando B.; ANDRADE, Roberto F. S.; CASTILHO, Caio M. C. de. Geometria fractal: propriedades e características de fractais ideais. *Revista Brasileira de Ensino de Física*. Volume 3, Número 2, 2008.
- [10] BANDT, Christoph; FALCONER, Kenneth; ZAHLE, Martina. *Fractal Geometry and Stochastics V*. Birkhauser. 2015.
- [11] RIBEIRO, Daniel Luiz; CARRIJO, Gilberto Arantes. Projeto de uma antena fractal de microfita multibanda. XIV CEEL. 2016.

- [12] *Research in the relationship between the electrical performance and its geometry structure*. Disponível em: <<http://home.ustc.edu.cn/~nkxb/research.html>> . Acesso em: 09 de Out de 2016.
- [13] OLIVEIRA, Elder E. C.; MARTINS, Ronaldo de A.; D'ASSUNÇÃO, Adaildo G.; OLIVEIRA, João B. L. Antenas de Microfita utilizando a Curva de Fractal de Minkowski. Disponível em: <<http://connepi.ifal.edu.br/ocs/index.php/connepi/CONNEPI2010/paper/view/8>> . Acesso em: 29 de Set de 2016.
- [14] ANSYS Releases Ansoft Designer 6.0. Disponível em: <<http://www.ansys.com/About-ANSYS/News-Center/07-29-10-ANSYS-Releases-Ansoft-Designer-6-0>> . Acesso em: 26 de Out de 2016.
- [15] Capítulo 2: Análise de Estruturas via ANSYS. PUC-Rio. Disponível em: http://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/5111/5111_3.PDF. Acesso em 07 de Out de 2016.
- [16] *Designer Tutorial 1. Microstrip Transmission Line*. Disponível em: http://www.emtalk.com/designer_tut_1.htm. Acesso em: 11 de Out de 2016.
- [17] Microstrip Calculator. Disponível em: <https://www.microwaves101.com/encyclopedias/microstrip-calculator>. Acesso em: 25 de Set de 2016.
- [18] OLIVEIRA, Maciel A.; OLIVEIRA, Elder E. C.; NETO, Alfredo G.; SILVA, José; GONÇALVES, José; CRUZ, Josiel. Análise Paramétrica Em Uma Antena Patch Retangular De Microfita Com Fendas. Revista INNOVER, volume 1, número 4, Dezembro 2014.
- [19] CASTRO, F. C. C. de; FRANCO, P. R. G. Antenas: Capítulo II: O Irradiador Eletromagnético Elementar. PUCRS. Disponível em: www.feng.pucrs.br/~decastro/pdf/A_C2.pdf. Acesso em: 15 de Out de 2016.
- [20] Parâmetros Fundamentais das Antenas. Disponível em: http://professores.unisanta.br/santana/downloads/Telematica/Microondas_2/Antenas%20e%20Propagatpo/01-ParametrosFundamentais.pdf . Acesso em: 20 de Out de 2016.
- [21] Carta de Smith. Blog Nova Eletrônica. Disponível em: <http://blog.novaeletronica.com.br/carta-de-smith-smith-chart/>. Acesso em 18 de Out de 2016.
- [22] VSWR (*Voltage Standing Wave Ratio*). Disponível em: <http://www.antenna-theory.com/definitions/vswr.php>. Acesso em: 17 de Out de 2016.