



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
CENTRO MULTIDISCIPLINAR DE PAU DOS FERROS
BACHARELADO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA

JOÃO GABRIEL LOPES DE ALMEIDA

**ANÁLISE DO TAPETE DE SIERPINSKI NO PLANO DE TERRA DE
ANTENAS DE MICROFITA**

PAU DOS FERROS – RN

2022

JOÃO GABRIEL LOPES DE ALMEIDA

**ANÁLISE DO TAPETE DE SIERPINSKI NO PLANO DE TERRA DE
ANTENAS DE MICROFITA**

Monografia apresentada à Banca Examinadora do Curso Ciência e Tecnologia, da Universidade Federal Rural do Semiárido, em cumprimento às exigências legais como requisito parcial à obtenção do grau de Bacharel em Ciência e Tecnologia.

Orientador: Antonio Diego Silva
(UFERSA – Centro Multidisciplinar de Pau dos Ferros)

PAU DOS FERROS – RN

2022

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

L447a Lopes de Almeida, João Gabriel .
Análise do tapete de Sierpinski no plano de
terra de antenas de microfita / João Gabriel
Lopes de Almeida. - 2022.
41 f. : il.

Orientador: Antonio Diego Silva.
Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de Ciência e
Tecnologia, 2022.

1. Fractais. 2. Antenas de microfita. 3.
Tecnologia 5G. 4. HFSS. I. Silva, Antonio Diego ,
orient. II. Título.

Ficha catalográfica elaborada por sistema gerador automático em conformidade
com AACR2 e os dados fornecidos pelo autor(a).

Biblioteca Campus Pau dos Ferros
Bibliotecária: Erlanda Maria Lopes da Silva
CRB: 1115

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-
ÁRIDOCENTRO MULTIDISCIPLINAR DE PAU DOS
FERROS

**ANÁLISE DO TAPETE DE SIERPINSKI NO PLANO DE TERRA DE
ANTENAS DE MICROFITA**

JOÃO GABRIEL LOPES DE ALMEIDA

Monografia apresentada à Banca Examinadora do Curso Ciência e Tecnologia, da Universidade Federal Rural do Semiárido, em cumprimento às exigências legais como requisito parcial à obtenção do grau de Bacharel em Ciências e Tecnologia.

APROVADO EM:

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Antonio Diego Silva – UFERSA
Orientador

Prof. Josenildo ferreira Galdino – UFERSA
Membro da banca

Prof. Otavio Paulino Lavor – UFERSA
Membro da banca

PAU DOS FERROS – RN

2022

DEDICATÓRIA

A Deus, a todas as pessoas que são
importantes para mim e para as
que me tem como importante em
sua vida.

AGRADECIMENTOS

A Deus, primeiramente, que a todo momento me acompanhou com os adequados ensinamentos de compaixão, amor e fraternidade hoje e sempre. A minha mãe, Luiza, e minha irmã, Sara, que sempre foram minha sustentação em toda minha caminhada acadêmica, não tenho palavras para descrever todo o incentivo, ajuda e carinho que tive delas em todos os momentos. No decorrer destes três anos e meio que vivenciei na UFERSA - Campus Pau dos Ferros - fiz muitas amizades que quero levar para a vida toda. Dessa forma, eu gostaria de agradecer a todas as pessoas que a UFERSA me permitiu conhecer, dos docentes aos alunos. Em primeiro lugar, ao meu orientador Otávio, que aceitou me orientar neste trabalho e, desde os meus primeiros dias na UFERSA, foi um exemplo de profissional, conquistou minha admiração nas primeiras aulas. Também agradeço ao professor Diego, que surgiu no final deste trabalho e me deu toda a assistência possível. Também gostaria de agradecer a toda minha família, que se fez presente no decorrer desta caminhada: minhas tias Toinha, Maria e Margarida, que me ajudaram sempre que possível; aos meus primos, Gilmar, Eugenio, Diana, Monalisa, Lavínia e, em especial, a Larissa, por me ajudar nas edições e correções deste trabalho. Ao meu amigo Evandro, por me auxiliar durante esse período; ao meu amigo e professor Marcelo Lemos, por me acudir sempre que necessário, tirando um pouco do seu tempo para me apoiar; ao meu amigo Ricardo, pelo incentivo e dedicação que sempre teve por mim. Por fim, aos meus amigos: Sabrina, Jeferson, Gleison, Bruno, Thauan, Raquel, Jadson, Thamara, Luiz Augusto, Alan, Samilly, José Vitor, Lucas, Eduardo, Yure, Raul, Jaco, José, Rair, Douglas, João, pela força e compreensão.

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo fazer um estudo sobre o uso de fractais em antenas de microfita aplicadas em tecnologia 5G. Para isso, realizou-se um estudo prévio sobre as antenas, explorando desde sua origem e definição, até os métodos de análise e os critérios essenciais para a avaliação da aplicabilidade de uma antena. Além disso, com auxílio do software HFSS da Ansoft, foram analisados também os efeitos de estruturas em fractais dispostas em uma antena para atuar numa frequência de 2,6GHz. Também foi averiguada uma boa compatibilidade entre os resultados simulados e medidos para as antenas com dielétrico de fibra de vidro.

Palavras-chave: Fractais, Antenas de microfita, Tecnologia 5G, HFSS.

ABSTRACT

This work aims to make a study on the use of fractals in microstrip antennas applied in 5G technology. However, previously, we will make a preliminary study on antennas, exploring from their origin and definition, to the analysis methods and essential criteria for evaluating the applicability of an antenna. In addition, with the aid of Ansoft's HFSS software, the effects of fractal structures arranged in an antenna to act at a frequency of 2.6GHz were analyzed. It was also verified a good compatibility between the simulated and measured results, for the antennas with fiberglass dielectric.

Keywords: Fractals, Microstrip antennas, 5G technology, HFSS.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 – Modelo exemplo de antena de microfita**
- Figura 2 – Tipos de geometria do patch para antenas de microfita**
- Figura 3 – Tecnologia 5G**
- Figura 4 – Configuração de alimentação linha de microfita**
- Figura 5 – Fractal tridimensional esponja de Menger**
- Figura 6 – Auto-similaridade exposto em um pinheiro (fractal)**
- Figura 7 – Formação da curva de Koch**
- Figura 8 – Formação do triângulo de Sierpinski**
- Figura 9 – Fractal conjunto de Julia**
- Figura 10 – Formação do tapete de sierpinski**
- Figura 11 – Ícone do software HFSS**
- Figura 12 – Tela inicial do software HFSS**
- Figura 13 – Tela inicial de projetos HFSS**
- Figura 14 – Antena de microfita retangular (padrão)**
- Figura 15 – Primeiro nível de interação da antena**
- Figura 16 - Segundo nível de interação da antena**
- Figura 17 – Perda de retorno da antena com nível de interação 0**
- Figura 18 – Perda de retorno da antena com nível interação 1**
- Figura 19 – Perda de retorno da antena com nível de interação 2**
- Figura 20 – Perda de retorno da antena com os três níveis de interação**
- Figura 21 – Ganho em 3D da antena padrão**
- Figura 22 – Ganho em 3D da antena com nível de interação 1**
- Figura 23 – Ganho em 3D da antena com nível de interação 2**
- Figura 24 – Diagrama de radiação em 2D para antena padrão**
- Figura 25 – Diagrama de radiação em 2D para antena de configuração 1**
- Figura 26 – Diagrama de radiação em 2D para antena de configuração 2**

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
2 ANTENAS DE MICROFITA	13
2.1 Componentes	14
2.1.1 Patch	14
2.1.2 Substrato	14
2.1.3 Plano de terra	14
2.2 Tecnologia 5G	15
2.3 Parâmetros essenciais das antenas de microfita	16
2.3.1 Largura de banda	25
2.3.2 Diretividade	25
2.3.3 Ganho	26
2.3.4 Perda de retorno	26
2.3.5 Diagrama de radiação	27
2.4 Métodos de alimentação	27
2.4.1 Alimentação por linha de microfita	28
3 PARÂMETROS DA GEOMETRIA DOS FRACTAIS	30
3.1 Introdução	30
3.2 Características dos fractais	30
3.2.1 Complexidade infinita	30
3.2.2 Autossimilaridade	30
3.2.3 Estrutura fina	31
3.2.4 Simplicidade da lei de formação	32
3.3 Modelo de fractais	32
3.3.1 Curva de Koch	33
3.3.2 Triângulo de Sierpinski	34
3.3.3 Conjunto de Julia	34
3.3.4 Tapete de Sierpinski	35
4 SIMULAÇÃO DA ANTENA DE MICROFITA USANDO O PLANO DE TERRA	37
4.1 Software	37
4.2 Análise e experimento dos resultados	39
4.3 Projeto das antenas e suas configurações	40
4.4 Resultados atingidos com base nas simulações da antena	41
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	49
6 REFERÊNCIAS	50

INTRODUÇÃO

Desde o surgimento das primeiras civilizações, tornou-se necessária a comunicação. As primeiras inscrições advêm de 3000 a.C., quando o homem buscou na própria natureza meios de fazer seus registros, utilizando-se de pedras, madeira, areia, entre outros. Esses registros foram motivados pela carência de sobrevivência e também uma forma de deixar marcado um legado cultural.

Segundo a Teoria da Comunicação, o locutor é aquele que emite a mensagem. Já o interlocutor é quem recebe e decodifica. Com o desenvolvimento da ciência e das novas tecnologias, os meios de comunicação têm avançado consideravelmente, isso vem acarretando e proporcionando a amplificação dos conhecimentos e da comunicação no mundo.

Uma antena, por exemplo, é um item desenvolvido para irradiar ou captar ondas eletromagnéticas. Ela opera como uma interface entre uma linha de transmissão e o espaço livre, isso faz com que ela consiga atuar tanto como transmissor quanto receptor de ondas eletromagnéticas. O foco deste trabalho estará voltado de modo específico para as antenas de microfita. Diante disso, é necessário apresentar algumas de suas aplicações.

As antenas de microfita são ideais para diversas aplicações, principalmente as que requerem adequação da estrutura a uma superfície plana ou a qualquer tipo de superfície, além de técnicas de produção de circuito impresso de baixa tecnologia e robustez mecânica (BALANIS, 2005).

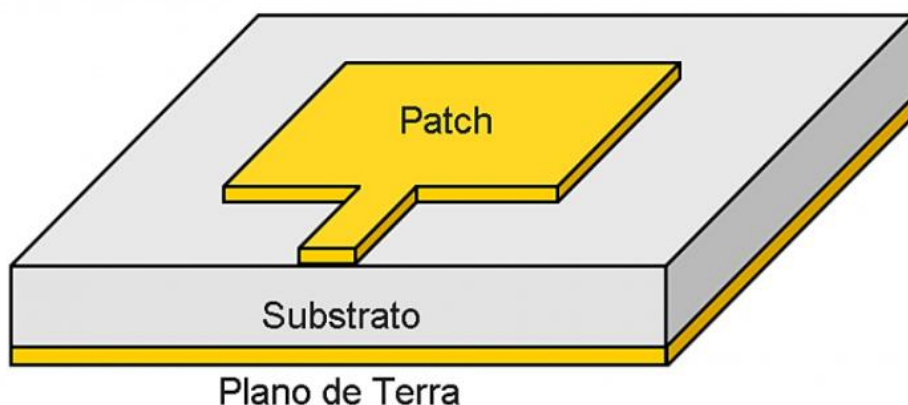


Figura 1 – Modelo exemplo de antena de microfita

Fonte: <https://allelectronicsgr.com.br/antenas-de-microfita/>

Na chamada era das tecnologias da informação e da cultura de massa, até chegarmos ao ponto da comunicação que chegamos, foram séculos de desenvolvimento. A rede 5G é a quinta geração das redes móveis. Concerne de um grande salto evolutivo em relação a rede 4G. O 5G é o próximo passo evolutivo para o desenvolvimento da banda larga sem fio, feita para conter o crescente volume de informações trocados dia após dia.

Estas propriedades expostas no parágrafo supramencionado são vistas nas antenas de microfita, as quais apresentam constantemente boa performance e são prontamente integradas em circuitos de micro-ondas. Além disso, elas apresentam como vantagem sua facilidade de construção e o seu pequeno peso.

Neste trabalho, estuda-se, inicialmente, no Capítulo 2, as antenas de microfita, com as explanações de suas componentes e de suas características, com a finalidade de propiciar ao leitor uma boa base teórica desses dispositivos e predeterminar para o estudo das antenas com geometrias não convencionais. Posteriormente, serão agregadas as ideias da geometria fractal, com a apresentação de suas propriedades fundamentais, como a autossemelhança e a complexidade infinita.

Além disso, no encontro das ideias anteriormente exibidas, serão analisadas as antenas com formatos fractais para a constatação de prováveis vantagens ou desvantagens desses dispositivos diante das antenas de microfita convencionais.

O software definido para auxiliar este trabalho foi o *High Frequency Structure Simulator* (HFSS) da Ansoft, software que apresenta estruturas em alta frequência, utilizada como instrumento de desenvolvimento de antenas e de componentes de circuitos eletrônicos utilizados na faixa de micro-ondas.

Este trabalho, portanto, tem como objetivo geral analisar as modificações em uma antena de microfita a partir da inserção de estruturas em fractais. Também deveremos observar suas peculiaridades como o estudo de fractais em antenas de microfita, analisar os parâmetros de antenas de microfita modificadas e, por fim, comparar estruturas fractais com outras estruturas.

2 ANTENA DE MICROFITA

Este capítulo expõe a definição das antenas de microfita, o que explanara seu desempenho e suas funções, como também seus diversos modelos de alimentação.

Os primeiros trabalhos sobre antenas de microfita foram publicados por Deschamps, na década de 1950, mais especialmente no ano de 1953, no III Simpósio sobre antenas, realizado pela força aérea dos Estados Unidos (Deschamps, 1953). As antenas são, teoricamente, disposições centrais entre o espaço livre e as linhas de transmissão.

Segundo Moraes (2011), algumas das vantagens que as antenas de microfita que conseguimos listar são:

1. Peso reduzido;
2. Baixo custo;
3. Perfil baixo;
4. Facilidade de fabricação.

Conforme atestou Moraes (2011), dependendo da circunstância em que almejamos utilizar uma antena de microfita, é possível expor algumas desvantagens, como, por exemplo:

1. Eficiência baixa;
2. Ganho baixo;
3. Largura de banda estreita.

Todavia, independentemente dessas desvantagens, encontram-se artifícios de reduzi-los, uma vez que, exemplificando, o truncamento do plano de terra para ampliar a largura de banda da antena. Um dos critérios fundamentais para a aplicabilidade de uma antena de microfita é a geometria do componente radiante ou patch da antena. Sua geometria é possível ser das mais diversificadas formas, conforme mostrado na Figura 3.

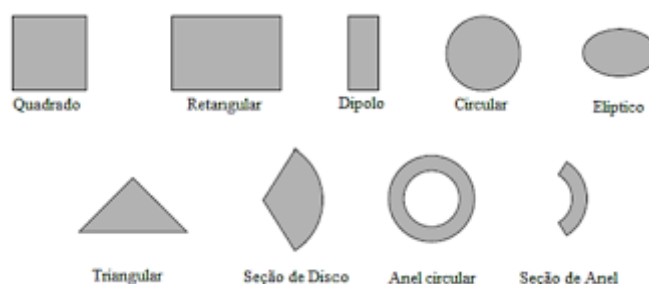


Figura 2 – Tipos de geometria do patch para antenas de microfita

Fonte: <https://ppgee.ufersa.edu.br/wp-content/uploads/sites/61/2014/09/Vers%C3%A3oFinalLucas.pdf>

2.1 COMPONENTES

As antenas de microfita apresentam uma peça metálica irradiante intitulado patch, um sedimento de dielétrico chamado substrato e um plano de terra como partes essenciais.

2.1.1 Patch

O patch é o componente fundamental das antenas de microfita, ele tem capacidade de demonstrar diversas formas, como o exemplo mostrado na Figura 3. Além disto, a configuração desse objeto metálico transforma de modo direto a disposição de corrente, que, por consequência, modifica a estruturação dos campos na superfície da antena.

2.1.2 Substrato

Os substratos possuem dois parâmetros que exigem ser analisados durante o projeto da antena, são elas a constante dielétrica e a sua espessura. Consequentemente, a constante dielétrica intervém consideravelmente na largura de faixa da antena e na sua capacidade de irradiação, com objetivo de, quanto menor ela for, menor será a capacidade de excitação da onda de superfície e, por consequência, modifica-se o diagrama de irradiação da antena.

Outro parâmetro o qual deve ser levado em consideração é a espessura do substrato, que possui efeito na largura de faixa em conformidade ao coeficiente de onda estacionária, desta forma acontece dado que a espessura atua no acoplamento entre a alimentação e o objeto irradiador. Portanto, é possível garantir que, quanto maior a espessura de um substrato, maior será a largura de faixa, contudo, vai reduzir a capacidade no acoplamento entre a linha de transmissão e a antena.

2.1.3 Plano de terra

Nas costas do patch, encontra-se uma espécie de capa condutora disposta na parte inferior do substrato da antena, chamado plano de terra. Esse material tem como objetivo impedir o crescimento de um lóbulo traseiro resistente e pode ser utilizado

como um sistema de aterramento. Além disso, muitas vezes no campo teórico, é determinado o plano de terra como infinito com o propósito de favorecer o cálculo. No entanto, no campo prático, aproveita-se um plano um tanto maior que os limites do substrato para compor essa propriedade.

2.2 TECNOLOGIA 5G

A tecnologia 5G não é só mais rápida que 4G, ela tem como objetivo levar internet para dispositivos conectados (automóveis, câmeras de segurança, fechaduras eletrônicas entre outras milhares de aplicações) e facilitar o acesso de banda larga fixa com alta velocidade.



Figura 3 – Tecnologia 5G

Fonte: <https://www.verzani.com.br/blog/5g/>

A tecnologia 5G faz uso de faixas de frequência mais altas da telefonia. Ou seja, elas têm uma aptidão muito maior, mas, como os seus comprimentos de onda são menores, isso quer dizer que a cobertura é menor. Por esse motivo, são conhecidas como ondas milimétricas, tornando-se bloqueadas de maneira muito mais fácil por itens físicos. Todavia, os padrões ainda não foram concluídos para todos os protocolos 5G.

Dessa maneira, indubitavelmente, vão surgir módulos de antenas menores, promovendo as ondas milimétricas entre uma abundância maior de receptores e de transmissores. É evidente que isso vai permitir uma cobertura maior.

2.3 PARÂMETROS ESSENCIAIS DAS ANTENAS DE MICROFITA

Neste capítulo, serão abordados os parâmetros essenciais para explorarmos o desempenho das antenas de microfita, serão expostas a largura de banda, a diretividade, o ganho, a perda de retorno e o diagrama de radiação.

2.3.1 Largura de banda

A largura de banda diz respeito ao acúmulo de dados que são capazes de transmitir em um intervalo de tempo fixo. Uma vez que, nas antenas de microfita, é normalmente a comutação da impedância que delimita o padrão do desempenho.

A largura de banda é dada pela equação:

$$\text{onde} \quad BW = \frac{f_2}{f_1} \quad (1)$$

A largura da banda pode ser expressa pela posição f_1 e f_2 , quando f_2 for maior ou igual a f_1 utiliza-se:

$$\text{onde} \quad BW = \frac{f_2 - f_1}{f_0} \quad (2)$$

Quadro 1 – Quadro de termos e significados.

Termo	Significado
BW	Largura de banda
f_1	Frequência inferior
f_2	Frequência superior da faixa
f_0	Frequencia de operação

Fonte: O autor

2.3.2 Diretividade

A diretividade de uma antena delimita sua aptidão de acumular a energia irradiada em uma determinada direção. A diretividade é definida como sendo a razão entre a intensidade de radiação média sobre todas as direções (BALANIS, 2005). Ela pode ser calculada usando a equação 10.

$$D_{m\acute{a}x} = D0 = \frac{U_{m\acute{a}x}}{U0} = \frac{4\pi U_{m\acute{a}x}}{Prad} \quad (3)$$

Quadro 2 – Quadro de termos e significados.

Termo	Significado
D	Diretividade
D0	Diretividade máxima
Umáx	Intensidade de radiação
U0	Intensidade de radiação de fonte isotrópica
Prad	Potência total radiada

Fonte: O autor

2.3.3 Ganho

O ganho de uma antena é definido como sendo a máxima intensidade de irradiação de uma antena. Entretanto, apesar de o ganho estar diretamente relacionado à diretividade da antena, é uma medida que leva em conta mais a eficiência do dispositivo do que a sua diretividade. (BALANIS, 2005). Logo, o ganho pode ser calculado usando a equação 11.

$$G = \frac{4\pi U(\theta, \phi)}{Pin} \quad (4)$$

2.3.4 Perda de retorno

A perda de retorno (*Return Loss* - RL) caracteriza a quantidade do sinal que é reproduzido, ou seja, ela mostra a compatibilidade entre a potência incidente, quando uma onda incide na antena, e a refletida. Daí a razão de ondas estacionárias de tensão, pois quando a onda incide na antena uma fração dela é refletida para o meio externo. Diante disso, devido às reflexões contendo a onda incidente e a onda refletida, a superposição destas duas formaram um modelo de ondas estacionárias.

Wentworth (2006) definiu que o coeficiente de uma onda estacionária de tensão (*Voltage Stationary Wave Ratio* - VSWR) é calculado usando os valores máximos e mínimos da amplitude da onda estacionária. Logo, ela é dada pela equação 2.

$$VSWR = \frac{V_{m\acute{a}x}}{V_{m\acute{i}n}} = \frac{I_{m\acute{a}x}}{I_{m\acute{i}n}} = \frac{1 + \Gamma}{1 - \Gamma} \quad (5)$$

Onde o termo Γ é definido sendo o coeficiente de reflexão.

$$\Gamma = \frac{Z_c - Z_0}{Z_c + Z_0} \quad (6)$$

Logo os termos Z_c e Z_0 são de modo respectivo a impedância característica e a impedância da linha.

Como a perda de retorno indica a compatibilidade entre a potência incidente e a refletida, logo ela é dada pela equação 6.

$$RL \text{ (dB)} = -20\log\Gamma \quad (7)$$

Diante disso, o RL (Return Loss) é a perda de retorno. Sendo um ótimo padrão indicador para medir o desempenho de uma antena.

2.3.5 Diagrama de radiação

O diagrama de radiação representa graficamente o desempenho de uma antena quanto a sua irradiação. Através do diagrama, podemos analisar algumas características das antenas, sendo elas a diretividade, o lóbulo principal, ganho e razão. Embora a irradiação da antena seja tridimensional, frequentemente, este diagrama é encontrado nos planos horizontais e verticais. O projeto de uma antena de microfita é feito de tal modo que o seu diagrama de radiação apresente seu máximo na direção perpendicular ao patch da antena de microfita. Isso, consequentemente, faz com que ele seja normal ao plano de terra da antena (ANDRADE, 2013).

2.4 MÉTODOS DE ALIMENTAÇÃO

As antenas de microfita podem ser alimentadas de diversas maneiras. Os métodos mais utilizados são conhecidos como cabo coaxial, linha de microfita, acoplamento por abertura e por proximidade. Neste trabalho, o propósito é a análise da alimentação por linha de microfita. Em razão disso, essa configuração será aprofundada. A escolha do tipo de alimentação da antena varia segundo o projeto da antena, a escolha da técnica de

alimentação da antena depende de fatores como tamanho, largura de banda e casamento de impedância (SANTOS, 2016).

O método da linha de microfita integra próximo ao patch e acrescenta uma linha de cobre de largura da pelas equações 1 e 2.

$$Z_0 = \frac{120\pi}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} \ln \left(\frac{8h}{w} + \frac{w}{4h} \right), \frac{w}{h} < 1 \quad (8)$$

$$Z_0 = \frac{120\pi}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} \frac{1}{\left[\frac{w}{h} + 1,393 + 0,667 \ln \left(\frac{w}{h} + 1,444 \right) \right]}, \frac{w}{h} \geq 1 \quad (9)$$

2.4.1 Alimentação por linha de microfita

A alimentação por meio da linha de microfita resume-se em usar uma fita condutora com as mesmas características do condutor mostrado no patch. Essa linha de alimentação é de fácil fabricação e de modelagem bastante simples (BALANIS, 2005). Outrossim, essa linha possibilita que se obtenha um bom amoldamento de impedância com o elemento irradiador, sendo irrelevante englobar outros elementos para acontecer o casamento de impedância. O método de linha de microfita é composto por um condutor, geralmente muito menor que a largura do patch. O condutor de alimentação é de fácil fabricação, porém, à medida que a espessura do substrato é aumentada, também há o incremento nas ondas de superfícies e radiação espúria de alimentação, o que limita sua aplicação para larguras de banda de 2% à 5%. Sua representação elétrica pode ser vista na Figura 2.

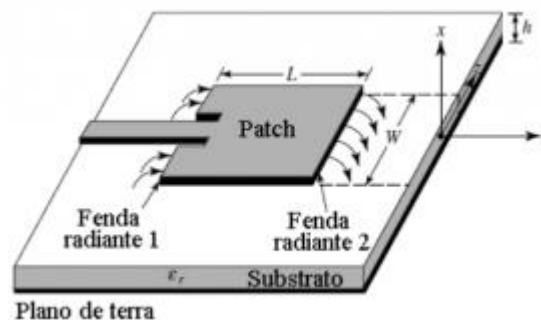


Figura 4 – Configuração de alimentação linha de microfita

Fonte: [Projeto de uma Antena de Microfita - All Electronics Group](#)

Para calcularmos as partes dos patches através do método das linhas de transmissão, deveremos utilizar as equações definidas de acordo com Santos (2016) e Balanis (2005):

$$\epsilon_{\text{eff}} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(1 + 12 \frac{h}{w} \right)^{-1/2}, \frac{w}{h} < 1 \quad (10)$$

$$\epsilon_{\text{eff}} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[\left(1 + 12 \frac{h}{w} \right)^{-\frac{1}{2}} + 0.041 \left(1 - \frac{w}{h} \right) \right], \frac{w}{h} \geq 1 \quad (11)$$

$$Fr = \frac{c}{2L\sqrt{\epsilon_r}} \quad (12)$$

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

$$\Delta L = 0.412h \frac{(\epsilon_{\text{eff}} + 0.3) \left(\frac{W}{h} + 0.264 \right)}{(\epsilon_{\text{eff}} - 0.258) \left(\frac{W}{h} + 0.8 \right)} \quad (14)$$

$$D = \frac{c}{4f\sqrt{\epsilon_r}} \quad (15)$$

$$L = \frac{c}{2f\sqrt{\epsilon_r}} + 2\Delta L \quad (16)$$

3 PARÂMETROS DA GEOMETRIA DOS FRACTAIS

Este capítulo tem como objetivo fazer análise das características que definem uma estrutura fractal e apresentar as estruturas mais utilizadas, sendo elas o triângulo de Sierpinski, curva de Koch, conjunto de Júlia. Para mais, vamos dar ênfase no tapete de Sierpinski, que será a estrutura utilizada neste trabalho.

3.1 Introdução

Em 1976, o matemático polonês Benoit Mandelbrot criou o termo geometria fractal visando explicar regras para o caos natural. Embora Mandelbrot tenha nomeado

esse tipo de figura, ele não descobriu, uma vez que estes já eram conhecidos (BENFICA; ALVES, 2010). O fractal é uma estrutura física ou geométrica e, predominantemente, são muitos equivalentes em diversos níveis de escala.

3.2 Características dos Fractais

Para uma estrutura ser classificada como um fractal tem que compreender certas características, como complexidade infinita, autossimilaridade, estrutura fina e simplicidade da lei de formação.

3.2.1 Complexidade infinita

A complexidade infinita diz respeito ao fato de que o desenvolvimento de formação de uma figura estipulado como um fractal, é recursivo, ou seja, que pode repetir infinitas vezes. A complexidade quando se realiza um maior número de interações, mais detalhada será a figura e, por consequência, não será obtida uma imagem final.

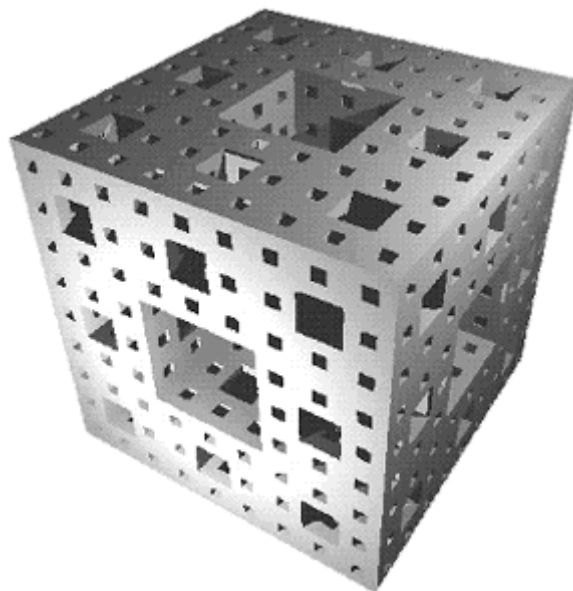


Figura 5 – Fractal tridimensional esponja de Menger

Fonte: [Esponja de Menger \(geocities.ws\)](http://geocities.ws)

3.2.2 Autossimilaridade

A autossimilaridade é uma característica de eventualidades configurações, agrupamentos ou objetos geométricos em revelar-se como macrocosmização de seus componentes, ou seja, em qualquer ponto de desenvolvimento do fractal, uma divisão dessa figura se equipara a uma parte maior ou a figura como um todo.

A autossimilaridade é uma propriedade integrante do processo de construção dos fractais, pois essas figuras são formadas por um processo recursivo indefinido, sendo assim, quanto maior a quantidade de interações, mais detalhada será a figura e, conseqüentemente, nunca será obtida uma “imagem final”, o que originou a expressão complexidade infinita.

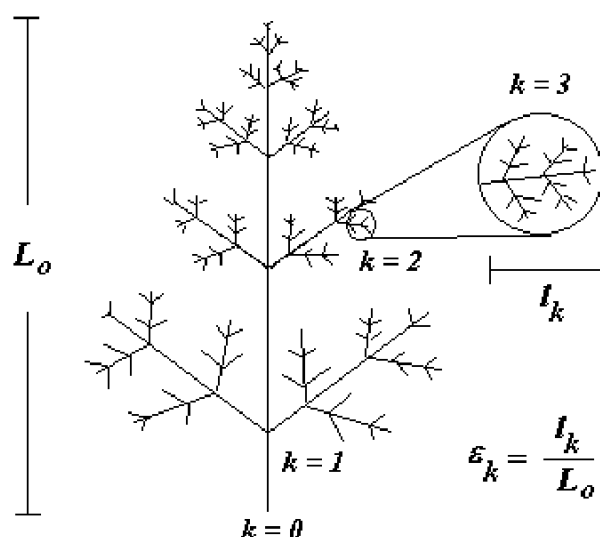


Figura 6 – Auto-similaridade exposto em um pinheiro (fractal), com diversos níveis de escalonamento, k.

Fonte: [8. Auto-similaridade presente em um pinheiro \(fractal\), com diferentes... | Download Scientific Diagram \(researchgate.net\)](#)

3.2.3 Estrutura fina

A particularidade que formaliza com que o grau de detalhamento não deprecie no momento em que se analisa exclusivamente uma pequena porção arbitrária, chamado de estrutura fina.

A estrutura fina apresenta um detalhamento infinito. Constantes ampliações de um fractal demandam mais detalhes, ou seja, qualquer ampliação vai acarretar em mais detalhes, mesmo que o processo se reitere indefinidamente

3.2.4 Simplicidade da Lei de Formação

A lei de formação de um fractal é a maneira que é reiterada a cada interação. O processo de construção de uma figura fractal pode ser iterativa, recorrente ou estocástica. Dessa forma, apesar da sua riqueza de detalhes e de sua complexidade de estrutura, as figuras são formadas por processos relativamente simples e diretos, o que se refere à característica intitulada de Simplicidade da Lei de Formação (DE, 2008).

3.3 Modelos de fractais

Existem diversos modelos de fractais produzidos por diversos matemáticos, por exemplo: curva de Koch, triângulo de Sierpinski, conjunto de Júlia e o tapete de Sierpinski.

3.3.1 Curva de Koch

A curva de Koch trata-se de uma figura que foi desenvolvida pelo matemático sueco Niels Fabian Von Koch (1870 - 1924), que atribuiu seu nome ao fractal, hoje conhecido como “flocos de neve Koch”.

Segundo Murr et al (2003), a curva tem uma dimensão fractal $D \cong 1,2618$, ou seja, isso representa que, embora a curva de Koch não utilize toda a porção do plano que a comede, é imprescindível mais que uma curva para utilizar de todo o plano. Para conseguir obter a “Curva de Koch”, deve-se pegar um segmento de reta e em seguida dividi-lo em três partes equivalentes e daí em diante construir um triângulo equilátero. Para conseguir atingir a figura final deve-se repetir o processo indefinidamente.

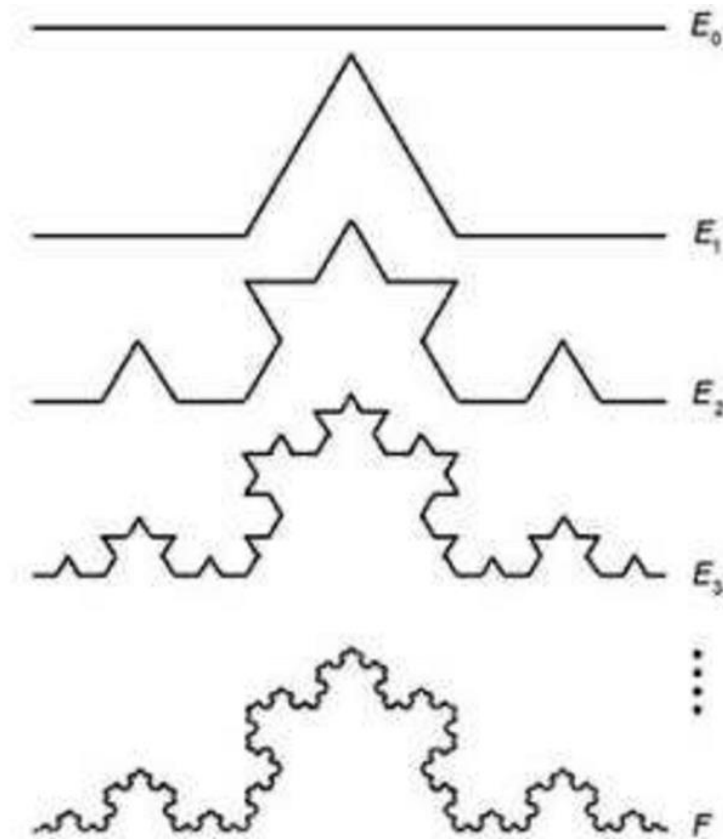


Figura 7 – Formação da curva de kock

Fonte: [11. Generación de la curva de Koch \[15\]. | Download Scientific Diagram \(researchgate.net\)](#)

3.3.2 Triângulo de Sierpinski

A figura intitulada “Triângulo de Sierpinski” foi criada pelo matemático polônes Waclav Sierpinski (1882 - 1969).

Segundo Murr et al (2003), a dimensão fractal do triângulo de Sierpinski, pode ser calculada usando a fórmula.

$$D = \frac{\ln(n)}{\ln(r)}$$

onde $n = 3$ devido ao número de triângulos triplicados para o outro nível e o fator de semelhança $r = \frac{1}{2}$. Logo, o resultado é $D \cong 1,585$.

Para obtermos essa figura, é essencial pegar um triângulo equilátero e, em seguida, retirar o triângulo estipulado pelos pontos médios dos lados, o que chegará na figura geradora. Por fim, vai repetir esse procedimento sucessivamente em todos triângulos equiláteros.

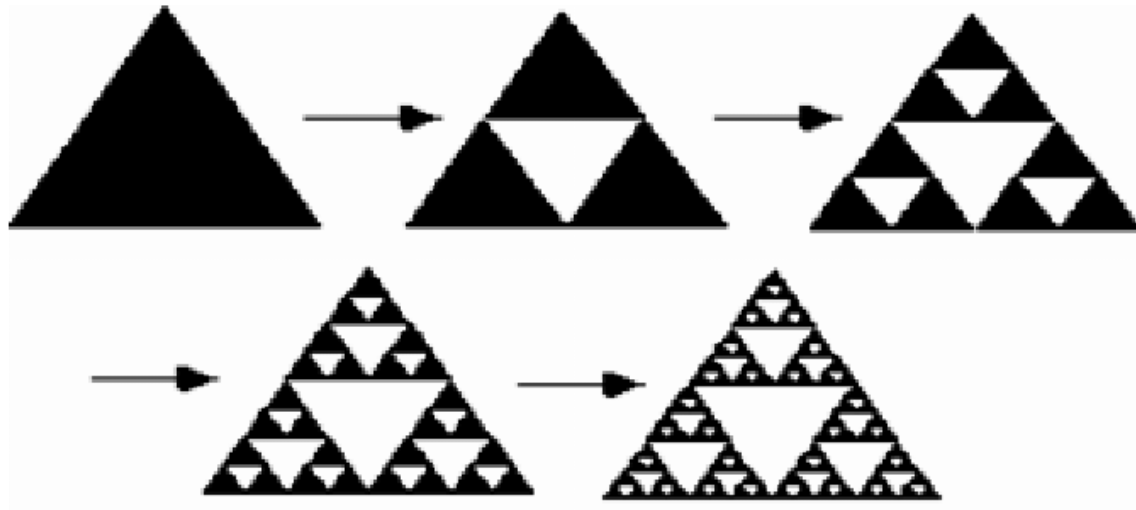


Figura 8 – Formação do triângulo de Sierpinski

Fonte: [Triângulo de Sierpinski](#) Fonte: SALLUM, 2005. | [Download Scientific Diagram \(researchgate.net\)](#)

3.3.3 Conjunto de Julia

A figura chamada conjunto de Júlia recebeu essa nomenclatura em homenagem ao matemático francês Gaston Maurice Julia (1893 - 1978). O conjunto de Julia é um modelo tradicional de fractal com autossimilaridade similar ou estatística, que apareceu a partir dos estudos com relação aos processos iterativos com números complexos.

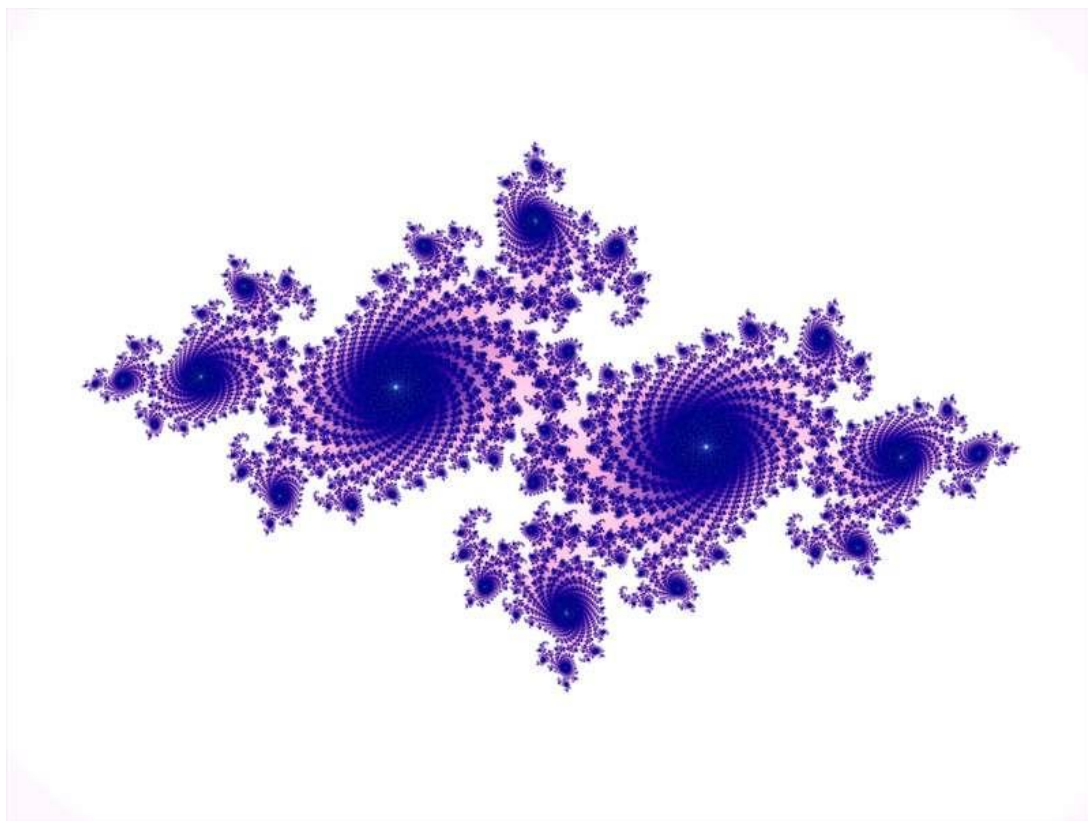


Figura 9 – Fractal conjunto de Julia

Fonte: [Photo | Les ensembles de Julia, des fractales somptueuses \(futura-sciences.com\)](http://futura-sciences.com)

3.3.4 Tapete de Sierpinski

O tapete de sierpinski é uma figura plana desenvolvida pelo matemático polônes Waclav Sierpinski (1882 - 1969). Essa figura é alcançada através de um método iterativo de remoção de um retângulo em nove retângulos similares. Em seguida, é excluído o retângulo médio e, por consequência, ficam somente oito retângulos. Por fim, repete-se o mesmo processo em cada um dos oito novos retângulos e, assim, continuamente.

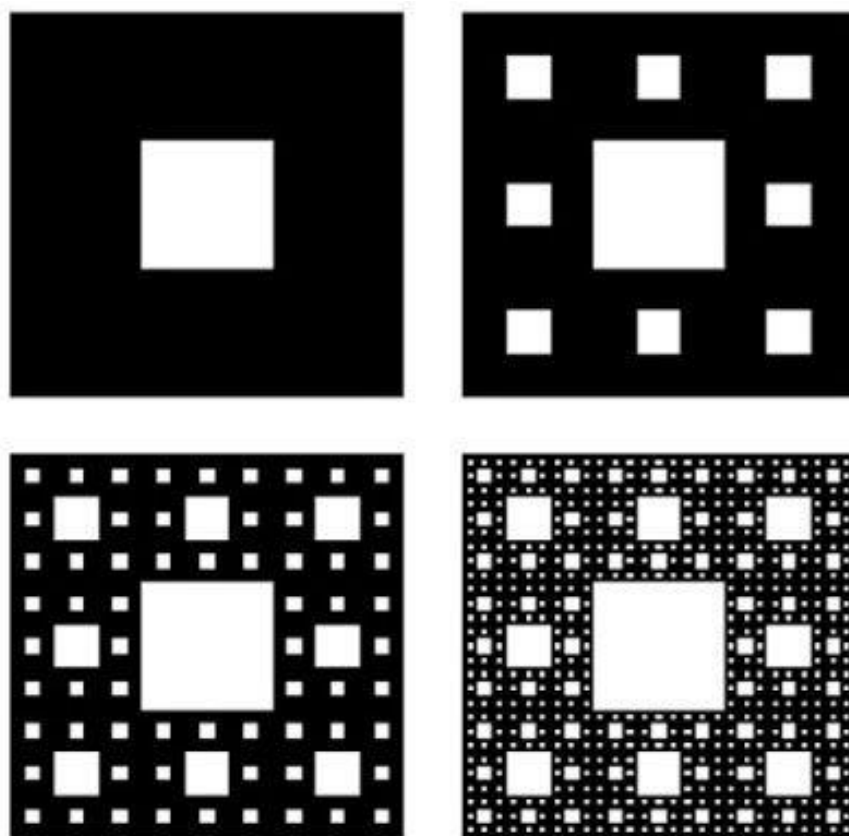


Figura 10 - Formação do tapete de Sierpinski

Fonte: [Fractais - Tapete de Sierpinski ~ Matemática do Renato | Fractals, Carpet, Journal doodles \(pinterest.jp\)](#)

4 SIMULAÇÃO DA ANTENA DE MICROFITA USANDO O PLANO DE TERRA

Neste capítulo faremos a análise do desempenho das antenas de microfita usando o tapete de Sierpinski no plano de terra.

4.1 Software

O software utilizado para a construção da antena foi o *Ansys High Frequency Electromagnetic Field Simulation Software* (HFSS). Ele é designado à simulação de objetos eletrônicos de alta frequência, como antenas ou componentes de microondas (filtros, conectores, interconectores de alta velocidade). Esse software oferece ferramentas para esclarecer adversidades encontradas durante os mais variados projetos, o que torna complexo e de difícil utilização. É manuseado globalmente para o aperfeiçoamento de produtos como satélites, produtos IoT e radares.



Figura 11 – Ícone do software HFSS

Fonte: [HFSS - Softronic Automation](https://www.ansys.com/Products/HFSS)

O kit de ferramentas do modelo de antenas proporcionado pelo software HFSS é um programa informático independente que mecaniza a elaboração de geometria, parametrização das explicações e resumos de preparação para mais de 50 tipos de antenas. Todavia, não considera as antenas de microfita com formato de fractais. Por

consequência, faz-se necessário utilizar o kit para desenvolver uma antena de microlinha retangular e realizar manualmente ou por meio de automatização as interações necessárias para se obter esses dispositivos não convencionais.



Figura 12 – Tela inicial do software HFSS

Fonte: O Autor

Outrossim, a junção do software HFSS com o Kit de ferramentas possibilita aos engenheiros e projetistas verificarem diversos modelos de antenas, de que modo conjuntamente contribui para novos usuários a desenvolver e manejar as antenas utilizando o software. Em razão disso, essa ferramenta foi utilizada para conseguir as simulações e resultados expostos neste trabalho.

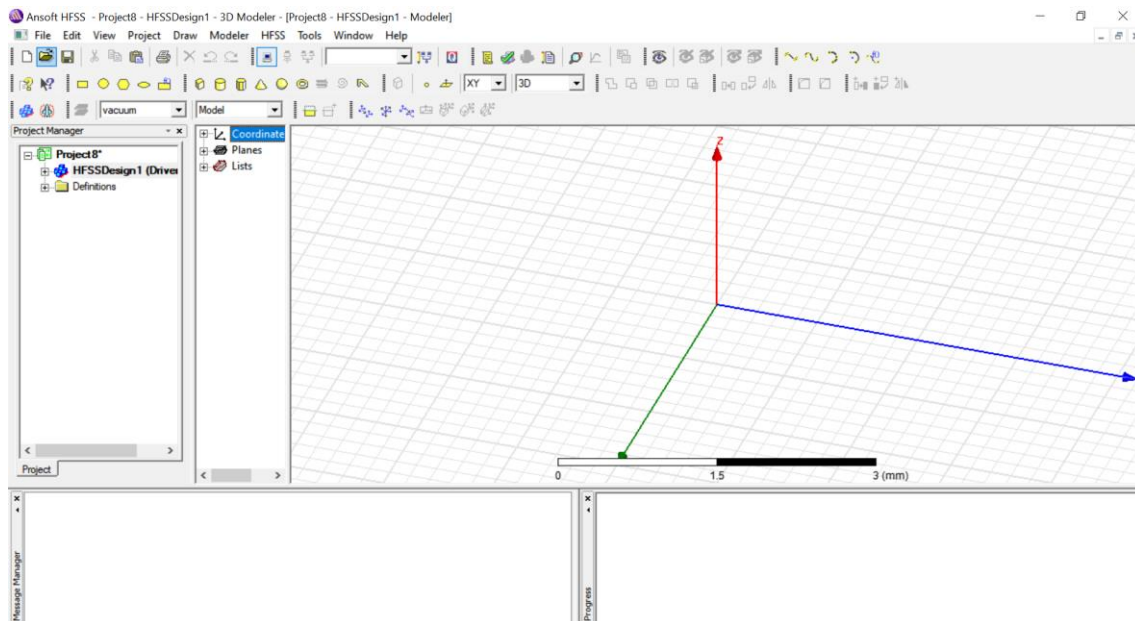


Figura 13 – Tela inicial de projetos do HFSS

Fonte: O autor

4.2 Análise e experimento dos resultados

Com o propósito de explorar o desempenho da antena de microfita com a geometria fractal do tapete de Sierpinski e de concretizar as resultâncias alcançadas, foi simulado um dispositivo projetado para atuar em uma faixa de frequência de 2,6 GHz. Ademais, a antena foi verificada nos seus três primeiros níveis de iteração essenciais para se conseguir a figura fractal.

4.3 Projeto das antenas e suas configurações

Inicialmente, a antena foi obtida a partir do kit de ferramentas de projeto de antenas do software HFSS, em seguida, foi selecionada a opção Patch Rectangular-Edge-Fed, o que derivou na antena de microfita retangular. De modo que até este momento não aconteceu qualquer processo iterativo essa antena será classificada como antena de microfita com geometria fractal tapete de Sierpinski padrão.

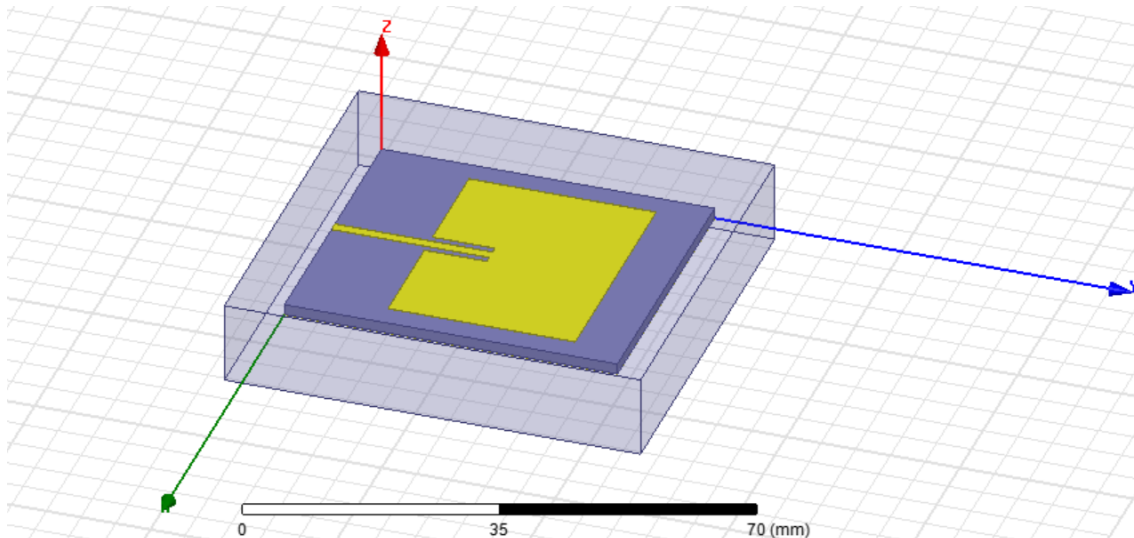


Figura 14 – Projeto de antena de microfita retangular (padrão)

Fonte: O autor

O patch de formato retangular é fracionado em nove retângulos iguais. Subsequentemente, é subtraído o retângulo do meio. Dessa forma, ficam somente oito retângulos, o que resulta na antena de microfita com geometria tapete de Sierpinski fractal um, Figura 15.

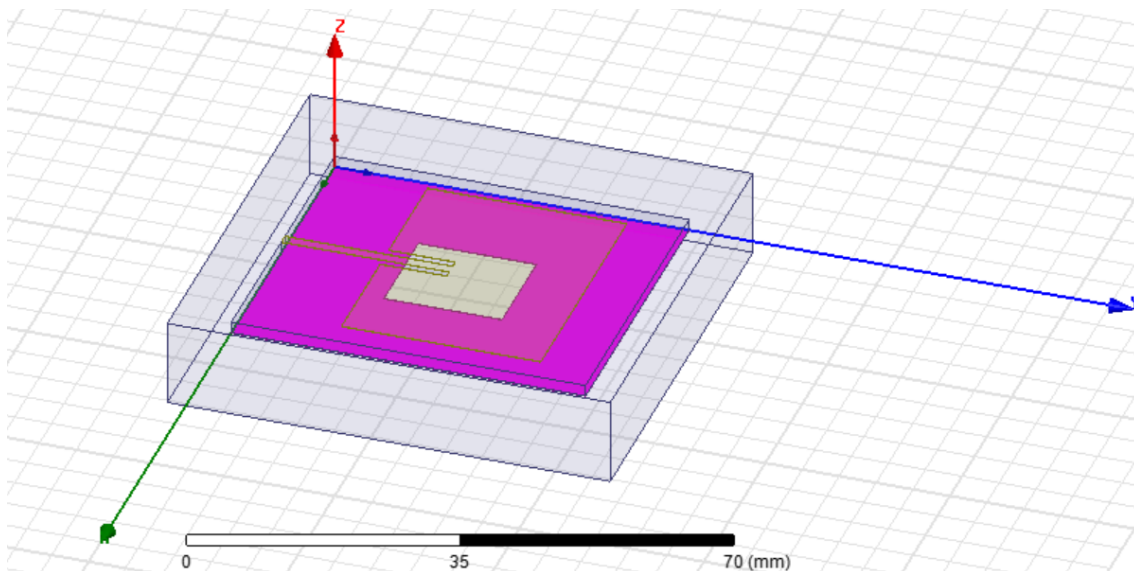


Figura 15 – Projeto de antena de microfita no primeiro nível de interação para se alcançar a figura fractal tapete de Sierpinski (configuração 1)

Fonte: O autor

A interação do método que foi citado acima em cada um dos oito novos retângulos vai resultar na antena de microfita com geometria fractal tapete de Sierpinski fractal dois, Figura 16.

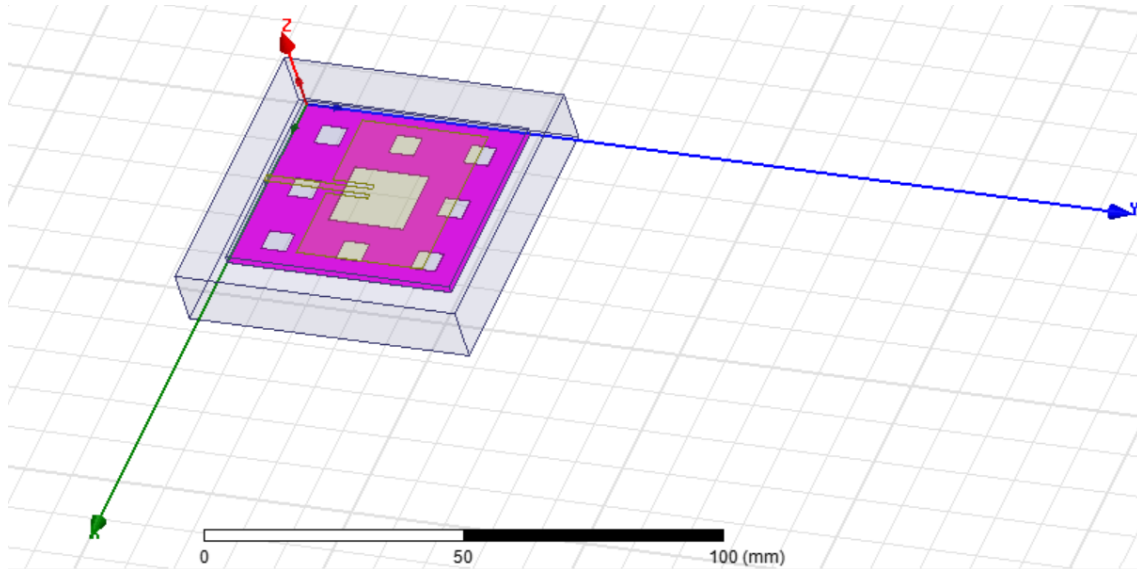


Figura 16 – Projeto de antena de microfita no segundo nível de interação para se alcançar a figura fractal tapete de Sierpinkki (configuração 2)

Fonte: O autor

Embora a inevitabilidade de efetivar o processo iterativo continuamente para que o grau de descrição não reduza quando se analisa somente uma pequena porção desnecessária da figura.

4.4 Resultados atingidos com base nas simulações da antena

A antena a ser verificada foi desenvolvida para operar na frequência de 2,6 GHz, cujas resultâncias relacionadas às perdas de retorno para os três diferentes níveis de interação estão exibidos abaixo.

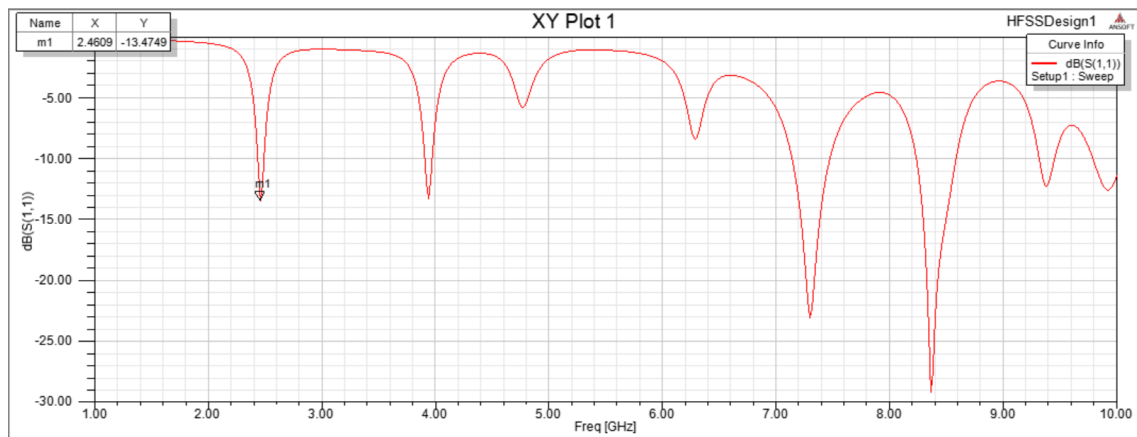


Figura 17 – Perda de retorno da antena com nível de interação 0 (padrão)

Fonte: O autor

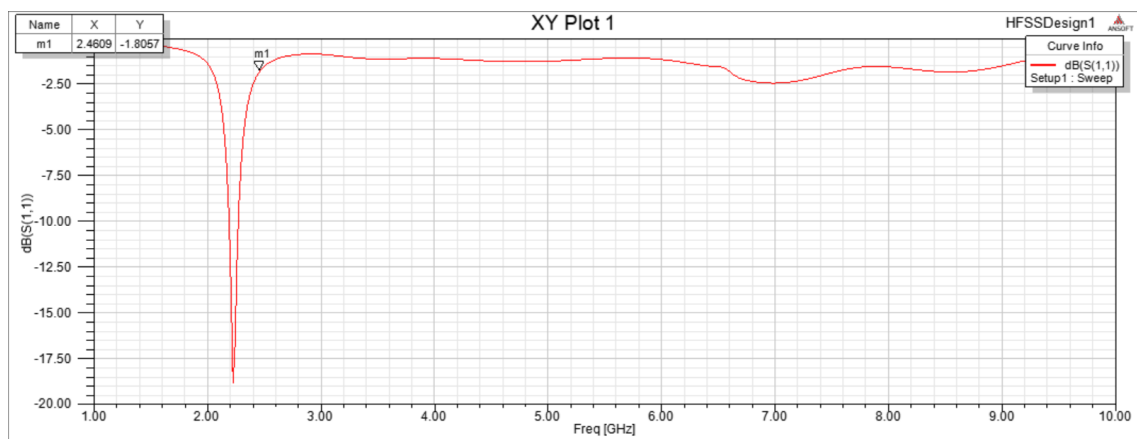


Figura 18 – Perda de retorno da antena com nível de interação 1 (configuração 1)

Fonte: O autor

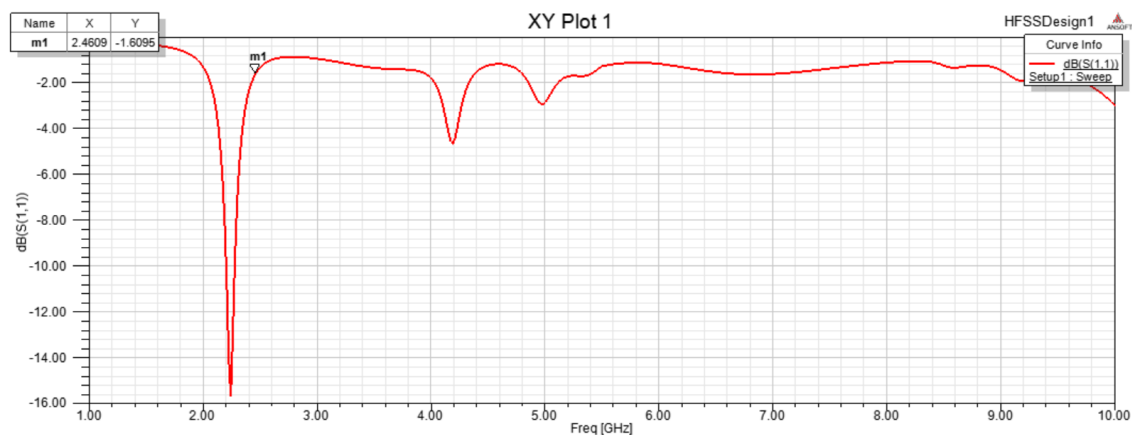


Figura 19 – Perda de retorno da antena com nível de interação 2 (Configuração 2)

Fonte: O autor

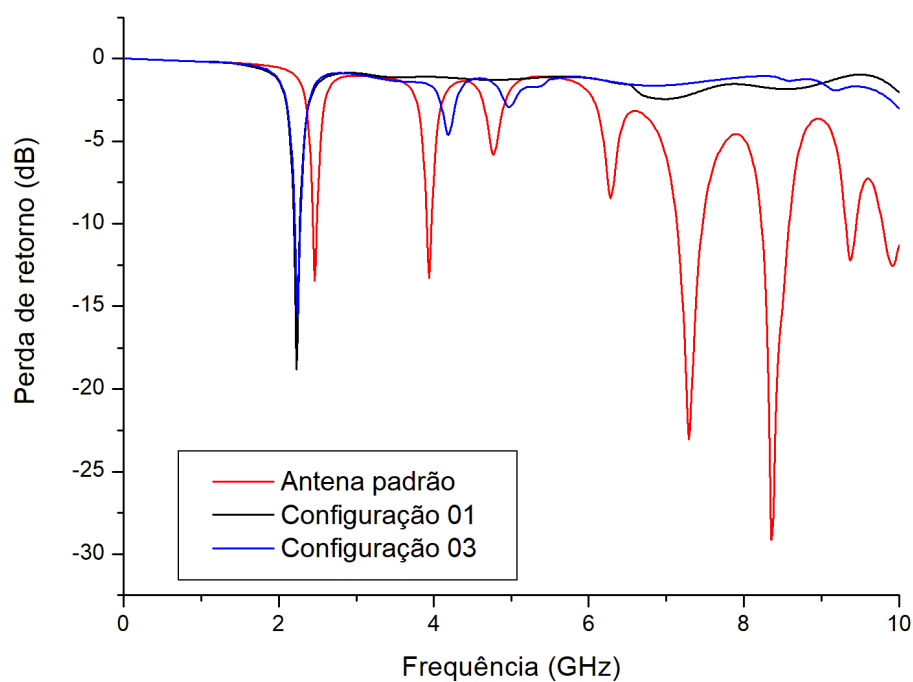


Figura 20 – Perda de retorno da antena com os três níveis de interação

Fonte: O autor

Logo após examinar os gráficos de perda de retorno alcançados no decorrer das simulações realizadas no software HFSS, pode-se juntar os dados na Tabela 03.

Nível de interação	Frequência de Ressonância	Perda de Retorno
0	2.4609	-13.4749
1	2.4609	-1.8057
2	2.4609	-1.6095

Tabela 3 – Resultados atingidos com base na simulação dos diferentes níveis de interação da antena

Fonte: O autor

Observa-se que, no primeiro nível de interação, nível de interação 0, tem uma frequência de ressonância bastante próxima à esperada. Além disso, comparando com o nível de interação 1, é evidente que não há mudança na frequência de ressonância (2.4609), inclusive verifica-se um aumento relevante da perda de retorno. Em razão disso, esse negativo chega a valores superiores a -10 dB.

Outrossim, o fato explicado no parágrafo acima se assemelha ao verificar as antenas de interação de níveis 1 e 2, já que as frequências de ressonância permanecem iguais (2.4609), mas verifica-se um aumento da perda de retorno (0,1962 dB).

Outra propriedade a ser apontada para uma análise mais incrementada da antena é o seu ganho, cujas resultâncias relacionadas a essa propriedade estão ilustrados abaixo.

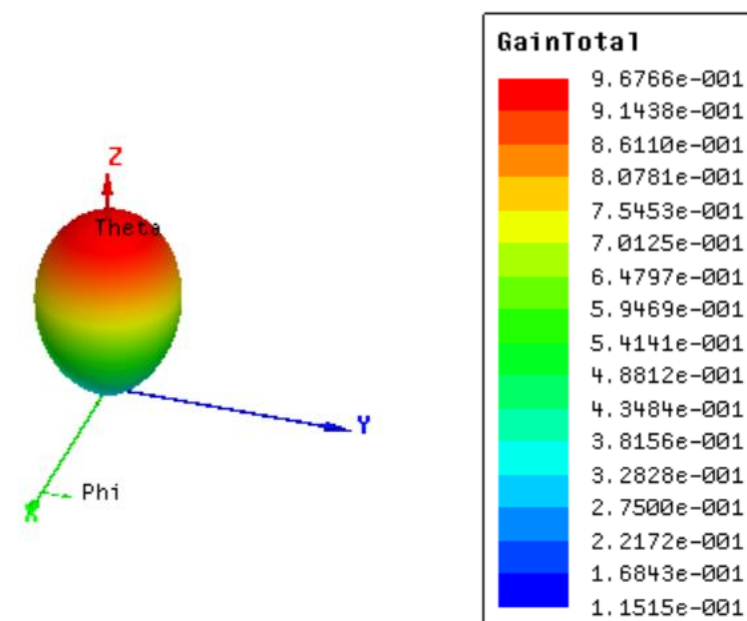


Figura 21 – Ganho em 3D da antena padrão com nível de interação 0 (Padrão)

Fonte: O autor

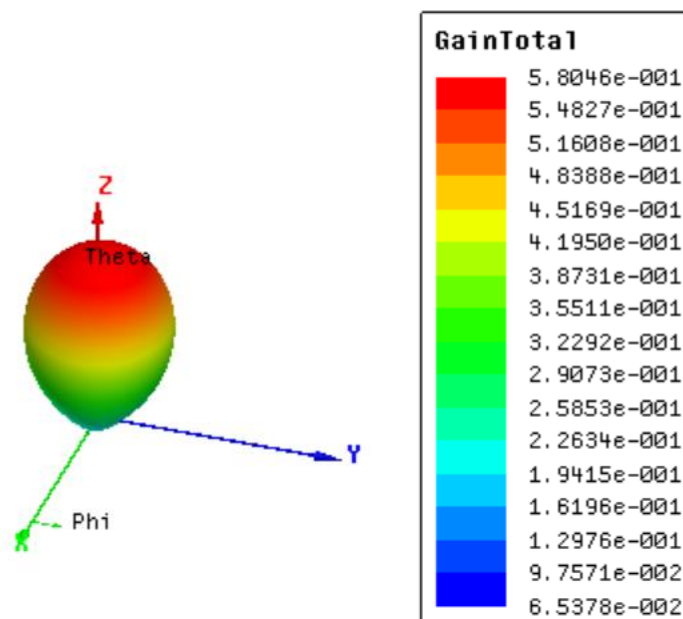


Figura 22 – Ganho em 3D da antena de configuração 1 com nível de interação 1

Fonte: O autor

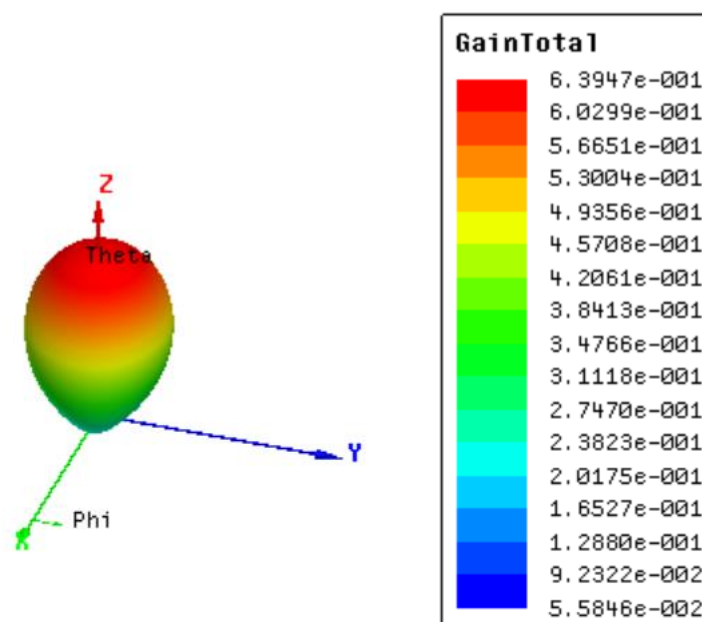


Figura 23 – Ganho em 3D da antena de configuração 2 com nível de interação 2

Fonte: O autor

Comparando os níveis de interação 0 e 1, pode-se certificar que acontece um aumento do ganho máximo da antena, de maneira que, da mesma forma, há um aumento da diretividade. Este parâmetro é nitidamente evidente ao se verificar a comparação das figuras 21 e 22. Porém, fato parecido não é verificado ao se comparar o ganho das antenas de nível de interação 1 e 2, dado que ocorre uma diminuição significativa com uma variação de 4.099 dB.

Por conseguinte, baseado nas análises alcançadas através do software HFSS, pode-se constatar que as antenas de níveis de interação 1 e 2 possuem perda de retorno maiores que a do nível de interação 0; já as antenas de níveis 0 e 1 possuem ganho maiores que a de nível 2. Logo, é possível perceber que as três antenas são atrativas, pois, simultaneamente, quando acontece uma maior perda de retorno o ganho similarmente aumenta.

Por último, outro parâmetro a ser analisado é o diagrama de radiação, os resultados referentes a essa característica estão ilustrados a seguir.

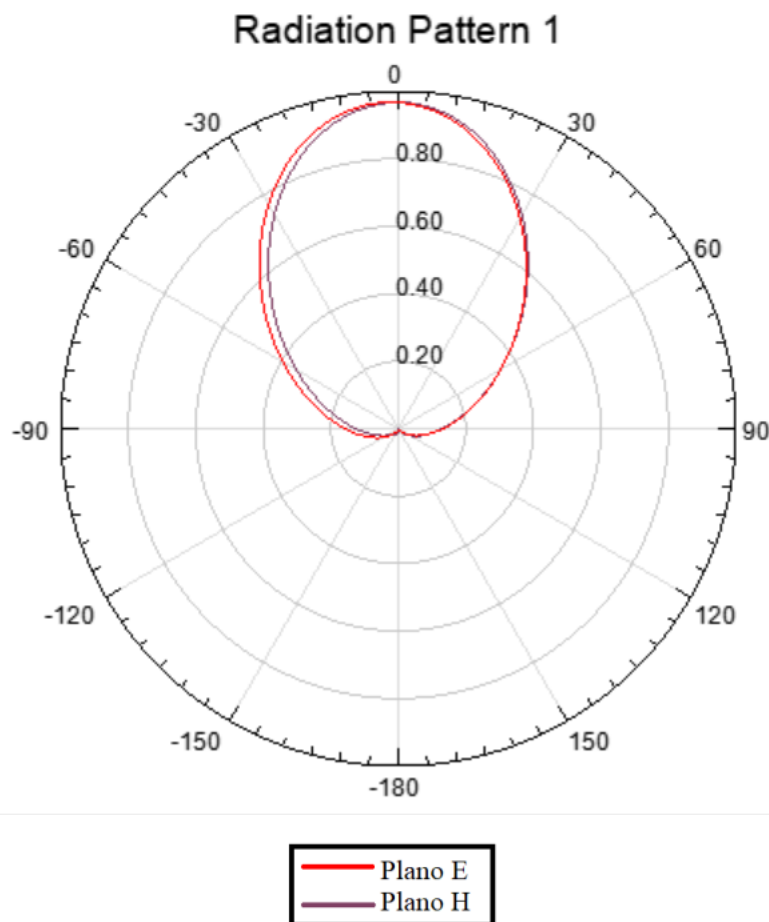


Figura 24 – Diagrama de radiação 2D para a antena de configuração padrão (nível 0)

Fonte: O autor

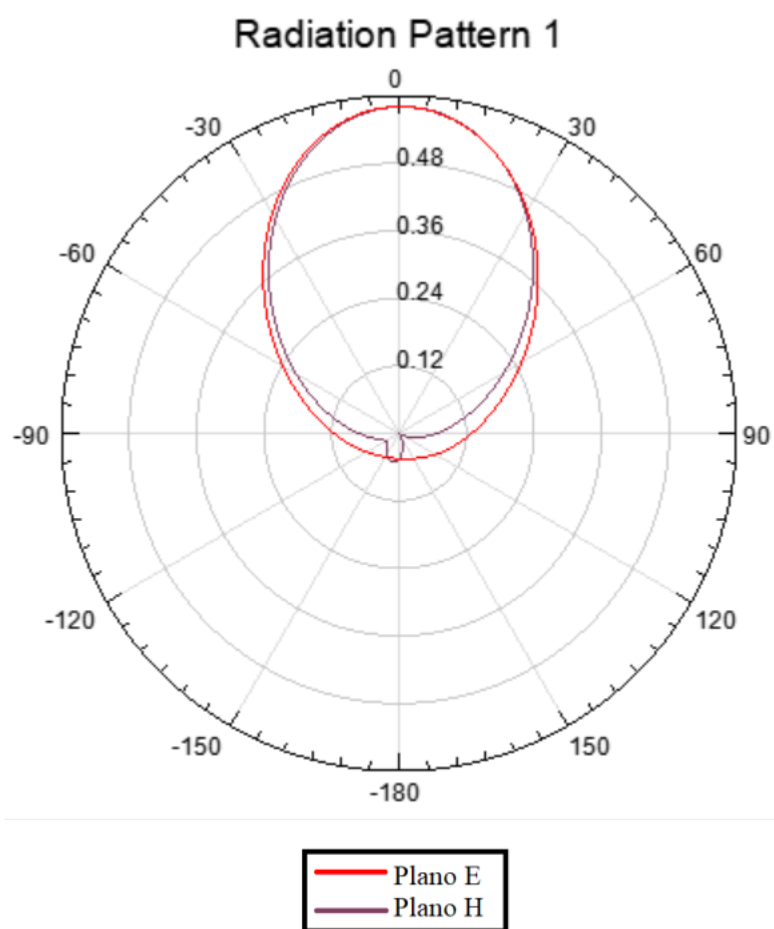


Figura 25 – Diagrama de radiação em 2D para a antena de configuração 1 (nível 1)

Fonte: O autor

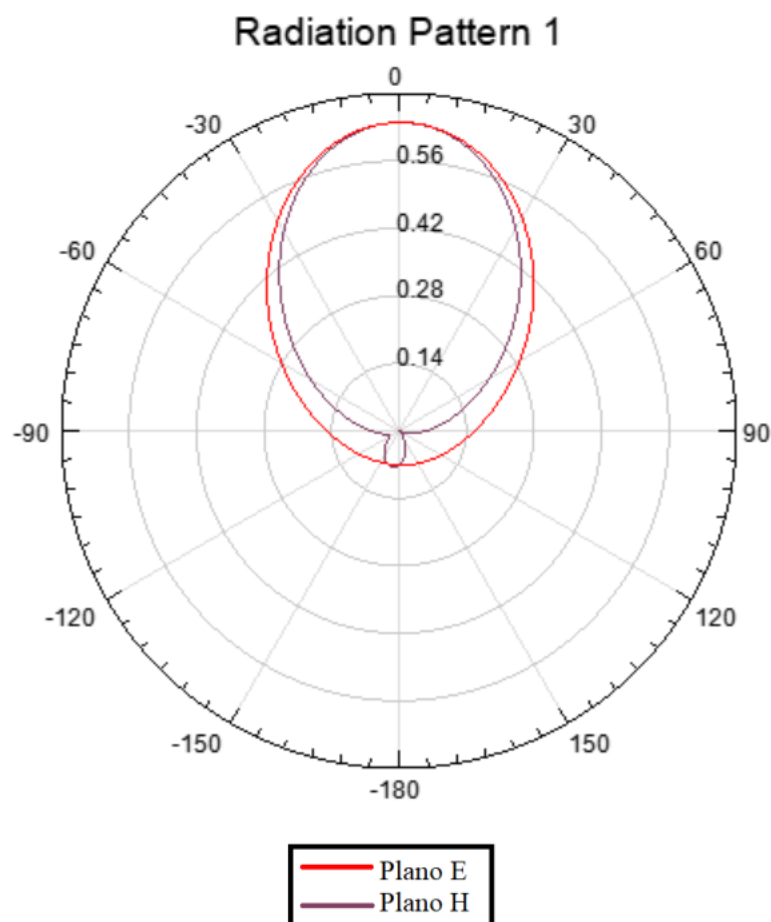


Figura 26 – Diagrama de radiação em 2D da antena de configuração 2 (nível 2)

Fonte: O autor

Após a análise do ganho podemos observar a diretividade dela para cada tipo de disposição, cujas direções radiam. Dado que as antenas de microfita são de tipo de geometria fractal planar, se torna padrão que se radiem em somente uma direção, isto é, da direção vertical à superfície para cima. Todavia, observarmos que em qualquer nível de interação da antena há dissipação de energia similarmente na direção contrária, o que é frequente, uma vez que a eficácia das antenas seja boa. Conseguimos ver isso evidentemente nos diagramas de radiação 2D, no qual as ondas radiadas na direção contrária têm cor azul e expõem uma pequena proeminência na superfície inferior do gráfico.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As antenas são, de maneira geral, estruturas mediais entre as linhas de transmissão e o espaço livre. Nos sistemas de transmissão sem fio, a antena é um dos componentes mais indispensáveis, visto que a proposta de um projeto desses recursos proporciona um adequado funcionamento para o sistema. Logo, um dos dispositivos são as antenas de microfita, dado que expõem consideráveis características, como baixo custo, peso reduzido e facilidade de fabricação.

Neste trabalho, foram expostas as antenas de microfita que apresentam formatos fractais em suas estruturas, apresentamos análises consideráveis no que se menciona aos dados apresentados para o diagrama de radiação, o ganho total e a perda de retorno alcançados por meio das simulações, a largura de banda apresentada no modelo de antena proposto, que pode ser observado no gráfico evidenciado pela Figura 16. Com este gráfico, conseguimos alcançar os valores da perda de retorno em decibéis (dB) da antena para cada frequência e, com isso, somos capazes de notar as faixas de frequência em que a antena funciona. Do mesmo modo, conseguimos examinar o casamento de impedância baseado nos resultados atingidos.

Com o diagrama de radiação da antena, conseguimos alcançar o ganho total em decibéis (dB) da antena, além de analisarmos a maneira como a radiação está sendo emitida pelas antenas e o seu desenvolvimento. Pelo gráfico demonstrado na Figura 16, que expõem o gráfico para a perda de retorno e o ganho para a antena com o plano de terra cheio, conseguimos observar que a antena melhor se ajusta a frequência de operação da tecnologia 5G.

6 REFERÊNCIAS

- ANDRADE, H. D. de. **Desenvolvimento de um Ressonador Retangular de Fenda com Múltiplas Camadas de Substrato e com Utilização de Material PBG para Sistema de Comunicação Sem Fio**. Tese (Doutorado – Engenharia Elétrica e da Computação) — Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Rio Grande do Norte, 2013.
- BALANIS, C. A. **Antenna Theory: Analysis and design**. Hoboken, New Jersey: John Wiley & sons. Inc, 2005.
- SANTOS, H. W. **Desenvolvimento de antenas de microfita miniaturizadas com polarização circular para sistema de comunicação sem fio**. Dissertação (mestrado – Engenharia elétrica e da computação) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2016.
- IEEE Standard for Definitions of Terms for Antennas. IEEE Std 145-2013 (Revision of IEEE Std 145-1993), p. 1–50, Março 2014.
- BALANIS, C. A. **Antena theory: analysis and design.**: Wiley, 2012
- CANAVEZ, Marcelo et al, 2019. RADOMES COMPOSTOS POR ANÉIS RESSONADORES EM ANTENAS DE MICROFITA EM 18 GHZ. **Conferência: IX CONGRESSO DE ENGENHARIAS DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO JOÃO DEL-REI**
- DESCHAMPS, A. G. **Microstrip microwave antennas**. 3 a USAF Symposium on Antennas, 1953.
- LAVOR, O. P. Bi **Anisotropia em Antenas de Microfita Retangular e Estruturas Circulares Modificadas**. Tese (Doutorado – Engenharia Elétrica e da Computação) — Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Rio Grande do Norte, 2015.
- MORAIS, J. H. C. de. **Estudo de Antenas Patches de Microfita Miniaturizadas em Banda Larga Para Aplicação em Dispositivos móveis e portáteis**. Dissertação (Mestrado – Engenharia Elétrica e da Computação) — Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Rio Grande do Norte, 2011.
- POZAR, D. M. **Microwave Engineering**. New Jersey, USA: John Wiley & Sons Inc. 2011, 2011.