

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA  
*CAMPUS* SANTA MÔNICA  
ENGENHARIA ELETRÔNICA E DE TELECOMUNICAÇÕES

MATHEUS DOS SANTOS SOUZA

**ANÁLISE DE ANTENAS DE MICROFITA COM  
GEOMETRIA QUASE FRACTAL**

UBERLÂNDIA

2019

MATHEUS DOS SANTOS SOUZA

ANÁLISE DE ANTENAS DE MICROFITA COM GEOMETRIA  
QUASE FRACTAL

Monografia apresentada à Universidade Federal de Uberlândia como parte das exigências para a aprovação na disciplina Trabalho de Conclusão de Curso I

Orientador: Prof. Dr. Gilberto Arantes Carrijo

UBERLÂNDIA

2019

MATHEUS DOS SANTOS SOUZA

**ANÁLISE DE ANTENAS DE MICROFITA COM  
GEOMETRIA QUASE FRACTAL**

Monografia apresentada à Universidade Federal de Uberlândia como parte das exigências para a aprovação na disciplina Trabalho de Conclusão de Curso I

APROVADA EM: 02 de Julho de 2019

---

**Prof. Dr. Gilberto Arantes Carrijo**

Orientador  
UFU

---

**Prof. Dr. Éderson Rosa da Silva**

UFU

---

**Prof. Dr. Alexandre Coutinho Mateus**

UFU

UBERLÂNDIA

2019

*Dedico esse trabalho a Deus, que foi minha maior força nos momentos difíceis.*

# Resumo

As antenas de microfita obtiveram grande popularidade nas últimas décadas, visto que as quais possuem propriedades interessantes, como baixo custo e facilidade de acomodação em pequenos espaços. Ademais, esta pesquisa tem como objetivo estudar o comportamento dos parâmetros fundamentais das antenas de microfita em diferentes níveis de iteração necessários para se obter as estruturas fractais. Outrossim, com o auxílio do software HFSS da Ansoft foram analisadas três antenas, projetadas para atuarem em diferentes frequências e níveis de iteração, com o objetivo de investigar a perda de retorno, a diretividade e o ganho.

**Palavras-chaves:** Antenas, Fractal, Microfita, HFSS.

# Abstract

Microstrip Antennas have gained great popularity in the last decades, since they have interesting properties, such as low cost and ease of accommodation in small spaces. In addition, this research has as objective to study the behavior of the fundamental parameters of the microstrip antennas in different levels of iteration necessary to obtain the fractal structures. Furthermore, with the support of Ansoft's HFSS software, three antennas was projected to operate at different frequencies and levels of iteration, with the objective of investigating the loss of return, directivity and gain.

**Key-words:** Antenna, Fractal, Microstrip, HFSS.

# Lista de ilustrações

Figura 1 – Componentes de uma antena de microfita . . . . .	14
Figura 2 – Exemplos de formas geométricas para o patch . . . . .	16
Figura 3 – Configuração de alimentação linha de microfita . . . . .	17
Figura 4 – Configuração de alimentação cabo coaxial . . . . .	18
Figura 5 – A samambaia é um exemplo de fractal encontrado na natureza . . . . .	21
Figura 6 – Função $f(x) = \text{sen}(x)$ . . . . .	22
Figura 7 – Figura Tapete de Sierpinski de nível de iteração 3 . . . . .	22
Figura 8 – Exemplos de figuras fractais . . . . .	23
Figura 9 – Formação do Tapete de Sierpinski com suas diversas interações . . . . .	24
Figura 10 – Formação do Triângulo de Sierpinski com suas diversas interações . . . . .	24
Figura 11 – Formação da Curva de Koch em suas primeiras iterações . . . . .	25
Figura 12 – Formação do Estrela de Koch com suas diversas interações . . . . .	25
Figura 13 – Fractal pertencente ao Conjunto de Julia . . . . .	26
Figura 14 – Ícone do software HFSS Versão 13.0.0 . . . . .	27
Figura 15 – Página inicial de projetos do software HFSS . . . . .	28
Figura 16 – Kit de ferramentas fornecido pela HFSS para o projeto de antenas . . . . .	29
Figura 17 – Seção do kit de ferramentas para o projeto de antenas de microfita . . . . .	29
Figura 18 – Projeto de antena de microfita retangular (nível 0) . . . . .	30
Figura 19 – Projeto de antena de microfita no primeiro nível de iteração para se obter a figura fractal tapete de Sierpinski . . . . .	31
Figura 20 – Projeto de antena de microfita no segundo nível de iteração para se obter a figura fractal tapete de Sierpinski . . . . .	31
Figura 21 – Perda de retorno da primeira antena com nível de iteração 0 . . . . .	32
Figura 22 – Perda de retorno da primeira antena com nível de iteração 1 . . . . .	33
Figura 23 – Perda de retorno da primeira antena com nível de iteração 2 . . . . .	33
Figura 24 – Ganho em 3D da antena número 01 com nível de iteração 0 . . . . .	34
Figura 25 – Ganho em 3D da antena número 01 com nível de iteração 1 . . . . .	35
Figura 26 – Ganho em 3D da antena número 01 com nível de iteração 2 . . . . .	35
Figura 27 – Perda de retorno da segunda antena com nível de iteração 0 . . . . .	36
Figura 28 – Perda de retorno da segunda antena com nível de iteração 1 . . . . .	36
Figura 29 – Perda de retorno da segunda antena com nível de iteração 2 . . . . .	37
Figura 30 – Ganho em 3D da antena número 02 com nível de iteração 0 . . . . .	38
Figura 31 – Ganho em 3D da antena número 02 com nível de iteração 1 . . . . .	38
Figura 32 – Ganho em 3D da antena número 02 com nível de iteração 2 . . . . .	39
Figura 33 – Perda de retorno da terceira antena com nível de iteração 0 . . . . .	39
Figura 34 – Perda de retorno da terceira antena com nível de iteração 1 . . . . .	40

Figura 35 – Perda de retorno da terceira antena com nível de iteração 2 . . . . .	40
Figura 36 – Ganho em 3D da antena número 03 com nível de iteração 0 . . . . .	41
Figura 37 – Ganho em 3D da antena número 03 com nível de iteração 1 . . . . .	41
Figura 38 – Ganho em 3D da antena número 03 com nível de iteração 2 . . . . .	42
Figura 39 – Gráfico do ganho máximo das três antenas . . . . .	44

# Lista de tabelas

Tabela 1 – Definição de faixas de frequências com micro-ondas . . . . .	15
Tabela 2 – Resultados obtidos a partir da simulação das diferentes iterações para a primeira antena analisada . . . . .	33
Tabela 3 – Resultados obtidos a partir da simulação das diferentes iterações da segunda antena analisada . . . . .	37
Tabela 4 – Resultados obtidos a partir da simulação das diferentes iterações para a terceira antena analisada . . . . .	40
Tabela 5 – Comparativo da variação dos resultados obtidos das três antenas simuladas para os diferentes níveis de iteração . . . . .	43

# Lista de abreviaturas e siglas

DCS	Distributed Control System
EHF	Extremely High Frequency
GSM	Global System for Mobile Communications
HFSS	High Frequency Structure Simulator
IOT	Internet of Things
SHF	Super High Frequency
UFU	Universidade Federal de Uberlândia
UHF	Ultra High Frequency
WLAN	Wireless Local Area Network

# Sumário

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>12</b>
1.1	Objetivos Gerais	12
1.2	Objetivos Específicos	13
<b>2</b>	<b>Antenas de Microfita</b>	<b>14</b>
2.1	Introdução	14
2.2	Histórico e aplicações	14
2.3	Componentes	15
2.3.1	Patch	15
2.3.2	Substrato	16
2.3.3	Plano de terra	16
2.4	Métodos de alimentação	17
2.4.1	Alimentação por linha de microfita	17
2.4.2	Alimentação por cabo coaxial	17
2.5	Características relevantes para análise do desempenho	18
2.5.1	Diretividade	18
2.5.2	Ganho	19
2.5.3	Perda de Retorno	19
<b>3</b>	<b>Fundamentos sobre geometrias fractais</b>	<b>20</b>
3.1	Introdução	20
3.2	Características dos Fractais	20
3.2.1	Auto-similaridade e complexidade infinita	20
3.2.2	Estrutura fina	21
3.2.3	Simplicidade da Lei de Formação	22
3.3	Exemplos de Fractais	23
3.3.1	Tapete de Sierpinski	23
3.3.2	Triângulo de Sierpinski	24
3.3.3	Curva de Koch	24
3.3.4	Conjunto de Júlia	26
<b>4</b>	<b>Simulação de antenas de Microfita com Geometria Quase Fractal</b>	<b>27</b>
4.1	Software	27
4.2	Experimentos e análise dos resultados	30
4.2.1	Configurações e projeto das antenas	30
4.2.2	Resultados obtidos a partir da simulação da primeira antena	32
4.2.3	Resultados obtidos a partir da simulação da segunda antena	36
4.2.4	Resultados obtidos a partir da simulação da terceira antena	39
<b>5</b>	<b>Conclusão</b>	<b>43</b>

**Referências . . . . . 45**

# 1 Introdução

É cada vez maior o interesse por antenas que atuam nas faixas de micro-ondas, iniciando em *Ultra High Frequency* (UHF) até as denominadas ondas milimétricas. Além disso, há uma demanda crescente pelo desenvolvimento de antenas mais compactas, visto que essas ocupam os limitados espaços no interior de aparelhos com tecnologias sem fio, como o telefone celular, laptop e outros.

Tais características descritas no parágrafo supracitado podem ser encontradas nas famosas antenas de microfita, as quais possuem usualmente bom desempenho e são facilmente integradas em circuitos de micro-ondas. Ademais, elas também possuem como vantagem seu pequeno peso e sua facilidade de construção.

Neste trabalho, estuda-se, primeiramente, no Capítulo 2, as antenas de microfita, com as descrições de seus componentes e de suas particularidades, com o objetivo de proporcionar ao leitor uma boa base teórica desses dispositivos e preparará-lo para o estudo das antenas com geometrias não convencionais. A posteriori, serão incorporados os conceitos da geometria fractal, com a exposição de suas características principais, como a auto-semelhança e a complexidade infinita.

Ademais, feita a união das teorias previamente apresentadas serão analisadas as antenas com formatos fractais, para a verificação de possíveis vantagens ou desvantagens desses dispositivos perante as antenas de microfita convencionais.

A ferramenta computacional definida para sustentar este trabalho foi o *High Frequency Structure Simulator* (HFSS) da Ansoft, software comercial que simula estruturas em alta frequência, empregada como ferramenta de desenvolvimento de antenas e de elementos de circuitos eletrônicos aplicados na faixa de micro-ondas.

## 1.1 Objetivos Gerais

1. Compreender os conceitos fundamentais das antenas de microfita, com o envolvimento dos sistemas de alimentação e a importância do corpo geométrico do patch;
2. Compreender os conceitos fundamentais da geometria fractal;
3. Examinar, com a assistência de ferramenta computacional, um modelo de antena de microfita que se beneficia da geometria fractal;
4. Apresentar o alto potencial das antenas de microfita com formato fractal na solução de dificuldades encontradas durante projetos de telecomunicações.

## 1.2 Objetivos Específicos

1. Interpretar o que cada elemento da antena de microfita perturba no seu comportamento;
2. Investigar o comportamento da antena de microfita com a geometria fractal do tapete de Sierpinski em diferentes níveis de iteração;

## 2 Antenas de Microfita

Este capítulo apresenta o conceito das antenas de microfita, o que irá explicitar seu funcionamento e aplicações, bem como seus diferentes tipos de alimentação.

### 2.1 Introdução

As antenas são, de modo geral, estruturas intermediárias entre o espaço livre e as linhas de transmissão. Contudo, além de receberem e transmitirem energia, as antenas em sistemas avançados podem ser utilizadas para potencializar ou acentuar a energia de radiação em determinadas direções e suprimi-las em outras. (BALANIS, 2005)

Em sistemas de comunicação sem fio, a antena é um dos elementos mais cruciais, uma vez que um projeto adequado desses dispositivos é capaz de promover um bom desempenho para o sistema. Em virtude disso, as antenas devem dispor de diferentes modelos para que sejam capazes de satisfazer as exigências dos mais variados projetos, entre elas estão as do tipo microfita.

Em suma, as antenas de microfita, também denominadas de antenas de microlinha, em seu modelo mais simples, são compostas de um elemento metálico irradiante nomeado de *patch*, impresso sobre uma camada de material dielétrico, sobre um plano de terra localizado na face inferior do substrato da antena, conforme mostrado na figura 1.

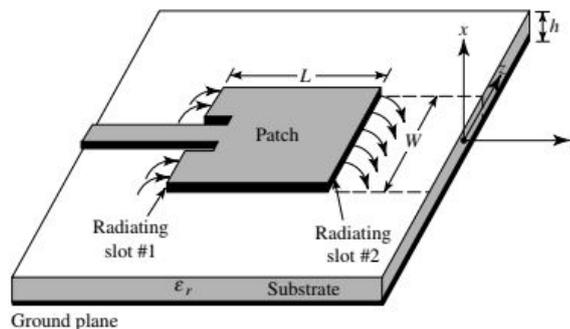


Figura 1 – Componentes de uma antena de microfita

Fonte: BALANIS (2005)

### 2.2 Histórico e aplicações

Em 1953, durante o terceiro Simpósio do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento de Antenas (*Antenna Research and Development Program*), foi apresentado por G. A.

Deschamps o trabalho "*Microstrip Microwave Antennas*", que se tratava do primeiro artigo sobre antenas de microfita. Porém, somente por volta da década de 70, as pesquisas para esses dispositivos foram intensificadas.

A princípio, esse modelo de antena era destinado aos sistemas militares, como mísseis, aeronaves, foguetes e satélites. Entretanto, esses dispositivos são empregados atualmente em sistemas de comunicação celular e em redes sem fio para áreas locais (WLANs). Ademais, essas aplicações só são viáveis por razão do baixo custo, do pequeno tamanho, da facilidade de instalação e da simplicidade de manufatura desses equipamentos. (LACERDA; JUNIOR, 2008)

Além disso, outra característica desses instrumentos é que, para se auferir uma performance eficiente, as antenas de microfita necessitam ser integradas em circuitos de micro-ondas, que são os tipos de ondas compreendidas entre as frequências de 300 MHz e 300 GHz, definidas nas faixas UHF, SHF e EHF (Tabela 1).

Faixa de Freq.	Comprim. de onda	Denom. Oficial	Tipo de onda
300 a 3.000 MHz	100 a 10 cm	UHF	Micro-ondas
3 a 30 GHz	10 a 1 cm	SHF	Micro-ondas
30 a 300 GHz	1 cm a 1 mm	EHF	Micro-ondas (milimétricas)

Tabela 1 – Definição de faixas de frequências com micro-ondas

## 2.3 Componentes

As antenas de microfita possuem um elemento metálico irradiante denominado *patch*, uma camada de dielétrico denominado *substrato* e um plano de terra como componentes fundamentais.

### 2.3.1 Patch

O patch é o principal elemento das antenas de microfita, ele é capaz de apresentar inúmeras formas, conforme exemplificado na figura 2. Outrossim, o formato desse componente metálico modifica diretamente a distribuição de corrente, que, por decorrência, altera a organização dos campos na superfície da antena.

Ademais, embora seja possível a utilização de diversos formatos para a construção do patch, recomenda-se que inicie o projeto desses dispositivos a partir dos valores geométricos do elemento irradiador, uma vez que as propriedades de radiação se mantêm semelhantes. (BALANIS, 2005)

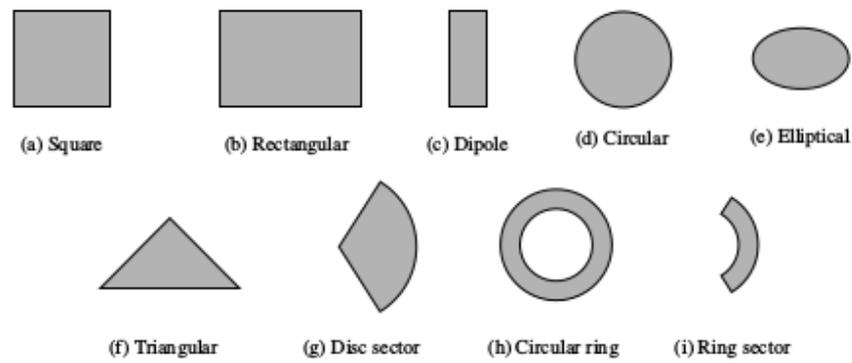


Figura 2 – Exemplos de formas geométricas para o patch

Fonte: BALANIS (2005)

### 2.3.2 Substrato

Por definição, os substratos dispõem de dois parâmetros que necessitam ser considerados ao longo do projeto da antena, que são a constante dielétrica e a sua espessura. Em visto disso, a constante dielétrica influencia substancialmente na largura de faixa da antena e na sua eficiência de irradiação, de modo que, quanto menor ela for, menor será a eficiência de excitação da onda de superfície e, conseqüentemente, altera-se o diagrama de irradiação da antena.

Outro parâmetro importante o qual deve ser considerado é a espessura do substrato, que tem efeito na largura de faixa em relação ao coeficiente de onda estacionária, isso ocorre pois a espessura influi no acoplamento entre a alimentação e o elemento irradiador. Por meio disso, pode-se afirmar que, quanto maior a espessura de um substrato, maior será a largura de faixa, no entanto, reduzirá a eficiência no acoplamento entre a linha de transmissão e a antena.

### 2.3.3 Plano de terra

Na face contrária do patch, existe uma cobertura de material condutor fixado na parte inferior do substrato da antena, intitulada *plano de terra*. Por definição, esse material tem como finalidade evitar o desenvolvimento de um lóbulo traseiro mais forte e servir como um sistema de aterramento. Ademais, por diversas vezes no campo teórico, é definido o plano de terra como infinito com o objetivo de facilitar o cálculo. Porém, já no campo prático, utiliza-se um plano um pouco maior que os limites do substrato para representar essa propriedade.

## 2.4 Métodos de alimentação

Existem diferentes configurações que podem ser empregadas para realizar a alimentação das antenas de microfita, que são classificadas em sistema direto, quando ocorre contato elétrico durante a alimentação, e sistema indireto, quando não ocorre conexão elétrica com o elemento de irradiação. Outrossim, os métodos de alimentação mais difundidos são os sistemas indiretos, como o método da linha de microfita e do cabo coaxial.

### 2.4.1 Alimentação por linha de microfita

No método de alimentação por linha de microfita, o sinal guiado na microlinha de fita é transferido para o irradiador, uma vez que sua produção segue a tecnologia do elemento irradiador, e portanto, consegue-se um conjunto plano e compacto. Além disso, esse sistema permite que se consiga uma boa adaptação de impedância com o elemento irradiador sem a necessidade de incluir outros elementos para realizar o casamento de impedância.

Ademais, com esse tipo de alimentação, se torna fácil a fabricação da antena, porém à medida que a espessura do substrato aumenta, ocorre uma elevação das ondas de superfície e da radiação espúria de alimentação, o que, para projetos práticos, limita a largura de banda.

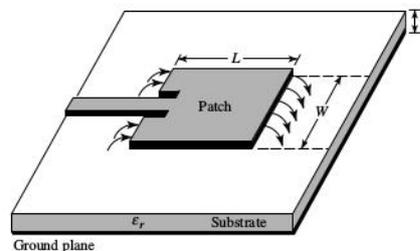


Figura 3 – Configuração de alimentação linha de microfita

Fonte: BALANIS (2005)

### 2.4.2 Alimentação por cabo coaxial

Neste método de alimentação, o condutor central atravessa o dielétrico e é conectado à plaqueta na parte superior do substrato, o que permite escolher o melhor ponto para conexão com o elemento irradiador e conseqüentemente um melhor casamento de impedância. Ainda, a alimentação por cabo coaxial apresenta facilidade de fabricação, entretanto se tem uma largura de banda estreita e uma difícil modelagem.

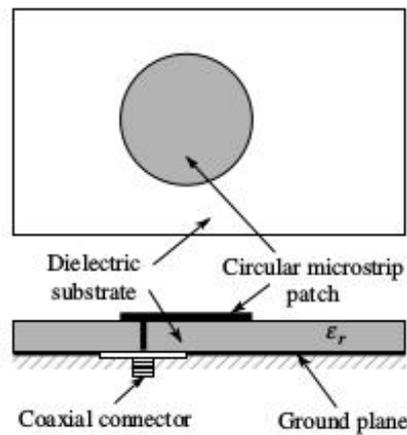


Figura 4 – Configuração de alimentação cabo coaxial

Fonte: BALANIS (2005)

## 2.5 Características relevantes para análise do desempenho

A fim de observar a performance e o desempenho desses dispositivos, se faz fundamental determinar alguns parâmetros, como diretividade, ganho e perda de retorno.

### 2.5.1 Diretividade

Diretividade de uma antena pode ser definida como a habilidade em concentrar a potência radiada em uma dada direção ou absorver a potência incidente a partir daquela direção. Quantitativamente, a diretividade ( $D$ ) de uma antena na direção de máxima radiação pode ser definida como a razão entre a intensidade de radiação máxima ( $U_{max}$ ) e a intensidade de radiação média ( $U_{media}$ ). (BALANIS, 2005)

$$D = \frac{U_{max}}{U_{media}} \quad (2.1)$$

E por definição a intensidade de radiação média ( $U_{media}$ ) é encontrada a partir da razão entre a potência total radiada pela antena ( $P_{rad}$ ) e o ângulo sólido da esfera contendo a antena.

$$U_{media} = \frac{P_{rad}}{4\pi} \quad (2.2)$$

Portanto, a diretividade de uma antena é representada pela equação 2.3

$$D = \frac{4 * \pi * U_{max}}{P_{rad}} \quad (2.3)$$

Sendo a diretividade um número adimensional e a intensidade de radiação definida por [Watts / Unidade de ângulo sólido].

## 2.5.2 Ganho

Outra característica de mensuração utilizada para analisar a performance de antenas é o *ganho*. Todavia, 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 sua diretividade. (BALANIS, 2005)

Portanto, a intensidade de radiação correspondente à potência irradiada isotropicamente é igual à potência aceita (entrada) pela antena dividido por 4. Em forma de equação, o ganho (G) pode ser definido como,

$$G = \frac{4 * \pi * U(\theta, \phi)}{P_{in}} (Adimensional) \quad (2.4)$$

## 2.5.3 Perda de Retorno

A Perda de Retorno (*Return Loss* - RL) é uma razão logarítmica, em Decibéis (dB), que relaciona a potência refletida (Pr) com a potência entregue (Pi) à antena pela linha de transmissão. Ademais, esta razão pode ser calculada por meio do coeficiente de reflexão de potência (R), o qual indica a proporção da potência incidente que é refletida devido o descasamento de impedância.

$$RL(dB) = -20 \text{Log}(|R|) = -20 \text{Log}\left(\frac{P_r}{P_i}\right) \quad (2.5)$$

## 3 Fundamentos sobre geometrias fractais

O objetivo deste capítulo é analisar as propriedades que definem uma estrutura fractal e apresentar as estruturas mais conhecidas, como o tapete de Sierpinski, triângulo de Sierpinski, curva de Koch e conjunto de Júlia.

### 3.1 Introdução

O termo fractal foi empregado pela primeira vez pelo matemático Benoit Mandelbrot, que se referia a um objeto construído recursivamente que, em qualquer iteração, qualquer pedaço do objeto é uma versão em escala reduzida do objeto na iteração anterior. Embora Mandelbrot tenha nomeado esse tipo de figura, ele não os descobriu, uma vez que estes já eram conhecidos. (BEMFICA; ALVES, 2010)

Ademais, os fractais são figuras geométricas que apresentam padrões complexos de infinitas repetições e com área finita, que já foram alvos de diversos matemáticos. Também, as quais podem ser obtidas geometricamente ou aleatoriamente, comumente de forma recursiva e que se obrigam a apresentar características pré-determinadas. (ASSIS et al., 2009)

### 3.2 Características dos Fractais

Uma figura, para ser considerada fractal, deve possuir determinadas características, como auto-similaridade, complexidade infinita, simplicidade da lei de formação e estrutura fina.

#### 3.2.1 Auto-similaridade e complexidade infinita

A auto-similaridade é uma propriedade necessária para se caracterizar um fractal, a qual possibilita que, em qualquer nível de construção do fractal, uma parte dessa figura se assemelhe a uma parte maior, ou à figura como um todo.

Contudo, ao se referir à auto-semelhança de figuras, devem ser consideradas dois tipos de auto-semelhança: a exata e a aproximada ou estatística. A auto-semelhança exata apenas existe em fractais gerados matematicamente, em que o conjunto total é formado a partir de processos iterativos, ou seja, quando o conjunto total é formado por pequenas réplicas perfeitas delas mesmas, como no caso do tapete de Sierpinski e da curva de Koch.

A auto-similaridade é uma propriedade integrante ao processo de construção dos fractais, pois essas figuras são formadas por um processo recursivo indefinido, sendo assim,

quanto maior a quantidade de iterações, mais detalhada será a figura, e conseqüentemente nunca será obtida uma "imagem final", o que originou a expressão *complexidade infinita*. (NUNES, 2006).

É necessário destacar que nem toda forma geométrica que sucede processos iterativos será um fractal. Por exemplo, se retirarmos um pequeno pedaço de um segmento de reta e reproduzirmos esse procedimento inúmeras vezes, não será obtido um fractal, e, sim, um segmento de reta cada vez menor.

Já a auto-semelhança aproximada ou estatística se refere às figuras que têm em suas partes a mesma estrutura, porém não são réplicas exatas. Além disso, esses fractais são encontrados em diversas formas da natureza, como nuvens, árvores e raios.



Figura 5 – A samambaia é um exemplo de fractal encontrado na natureza

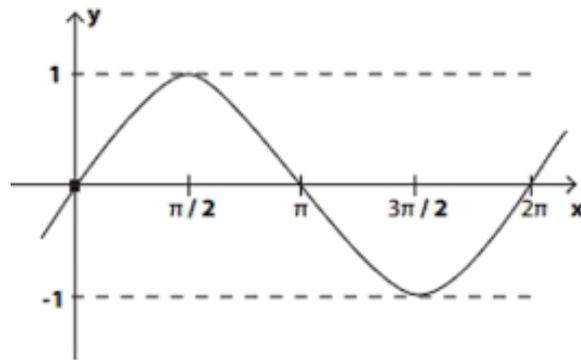
Fonte: (GEOMETRIA..., )

### 3.2.2 Estrutura fina

A propriedade que faz com que o grau de detalhamento não diminua quando se examina apenas uma pequena porção arbitrária da figura é denominada de *estrutura fina*. Essa característica permite que ao observar um trecho de uma figura seja encontrada a mesma riqueza de detalhes da curva inteira. Essa particularidade não é encontrada nas figuras geométricas convencionais. (DE, 2008)

Como exemplo, consideremos a função  $f(x) = \text{sen}(x)$  no intervalo de  $(0, +2\pi)$ , Figura 06.

Ao ser focalizado o trecho  $(\pi/2, \pi)$  da função  $f(x) = \text{sen}(x)$ , é percebida apenas uma ligeira curvatura e não uma senoide com a mesma riqueza de detalhes da função inteira, visto que, a cada vez em que a região observada diminuir, o detalhamento também diminuirá.

Figura 6 – Função  $f(x) = \text{sen}(x)$ 

Fonte: Autor (2019)

Como contra exemplo, considere a figura tapete de Sierpinski de nível 3, ou seja, a figura após passar 3 vezes pelo processo iterativo, Figura 07.

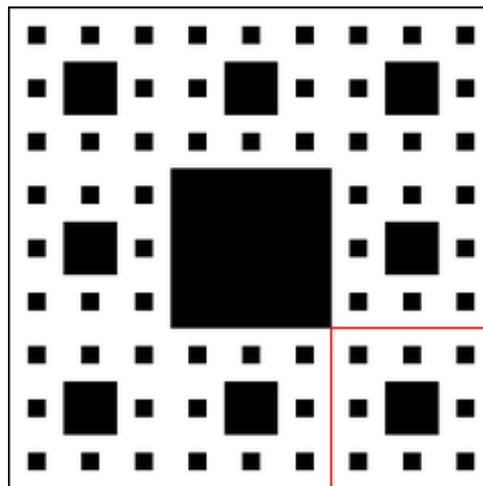


Figura 7 – Figura Tapete de Sierpinski de nível de iteração 3

Fonte: Autor (2019)

Ao focalizar o trecho em vermelho explicitado na figura 07, obtém-se o grau de detalhamento semelhante ao da figura como um todo, o que é caracterizado como um fractal.

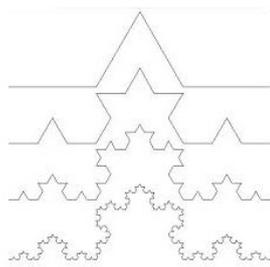
### 3.2.3 Simplicidade da Lei de Formação

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)

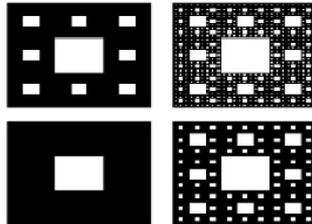
Embora sua construção seja feita por processos simples, não é possível descrevê-las em simples equações, como as figuras geométricas clássicas. Isso se dá, pois a geometria Euclidiana está diretamente ligada aos conceitos de altura, largura e comprimento. Já na geometria fractal, tem-se figuras que apresentam formas irregulares e dimensão fracionada.

### 3.3 Exemplos de Fractais

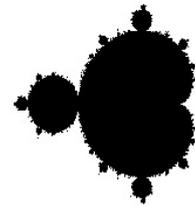
Existem notáveis fractais que foram desenvolvidos por diversos matemáticos, como o conjunto de Cantor, tapete de Sierpinski e curva de Koch.



**Curva de Koch**



**Tapete de Sierpinski**



**Conjunto de Mandelbrot**

Figura 8 – Exemplos de figuras fractais

Fonte: Autor (2019)

#### 3.3.1 Tapete de Sierpinski

O Tapete Retangular de Sierpinski trata-se de uma figura plana obtida a partir do estudo do matemático polonês Waclav Sierpinski (1882-1969). Essa figura é obtida por meio de um processo iterativo de divisão de um retângulo em nove retângulos idênticos. Posteriormente, é eliminado o retângulo central, o que resulta em apenas oito retângulos. Desse modo, repete-se no passo seguinte o mesmo procedimento em cada um dos oito novos retângulos, e assim sucessivamente.

Além disso, esse fractal é classificado como um geométrico, visto que possui todas as características que o definem como fractais, como a auto-semelhança, a estrutura fina e a simplicidade da Lei de formação.

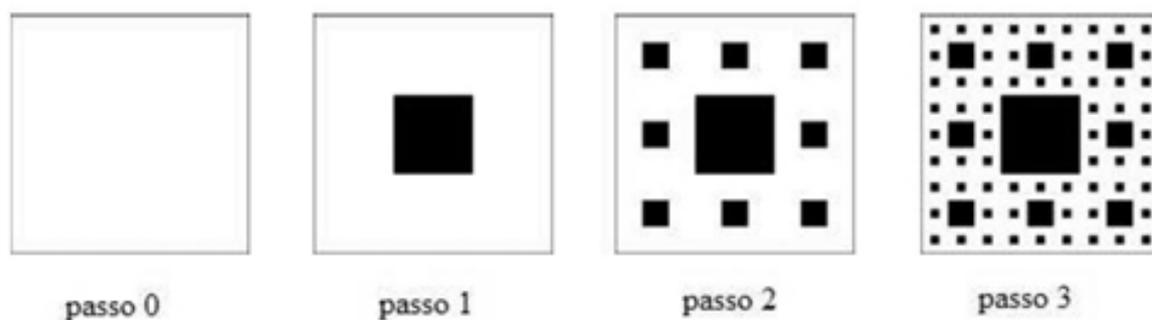


Figura 9 – Formação do Tapete de Sierpinski com suas diversas interações

Fonte: ([UCB2018...](#), )

### 3.3.2 Triângulo de Sierpinski

O Triângulo de Sierpinski trata-se de uma figura desenvolvida pelo matemático polonês Waclav Sierpinski. Para se obter essa figura, é necessário partir de um triângulo equilátero, e posteriormente, remover o triângulo equilátero definido pelos pontos médios dos lados, o que resulta na figura geradora. Repete-se esse processo sucessivamente, o que aplicará a figura geradora em todos os triângulos equiláteros restantes.

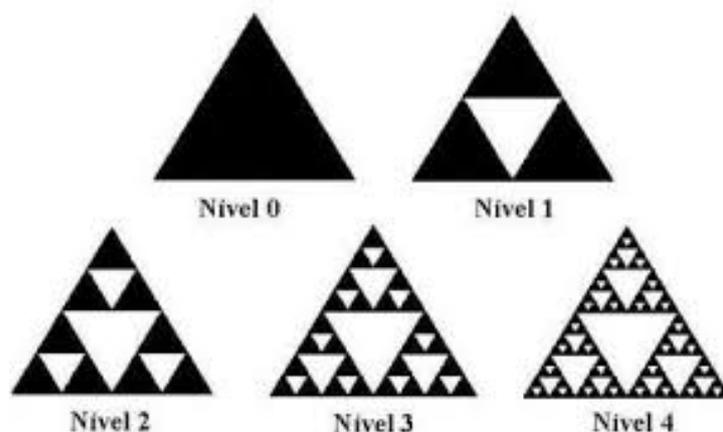


Figura 10 – Formação do Triângulo de Sierpinski com suas diversas interações

Fonte: ([LABORATÓRIO...](#), )

### 3.3.3 Curva de Koch

A figura intitulada "Curva de Koch" foi desenvolvida pelo matemático polonês Helge Von Koch, por volta dos anos de 1904 a 1906, o que originou as figuras "Ilha de Koch" e "Floco de neve de Koch". Ademais, para se obter a "Curva de Koch", inicia-se um segmento

de reta e, posteriormente, divide-se o segmento inicial em três partes iguais e se constrói um triângulo equilátero, tal como é possível ver na figura 11. Em razão disso, é obtido o nível 1 da "curva de Koch". Para se obter a figura "final", é necessário repetir esse processo indefinidamente.

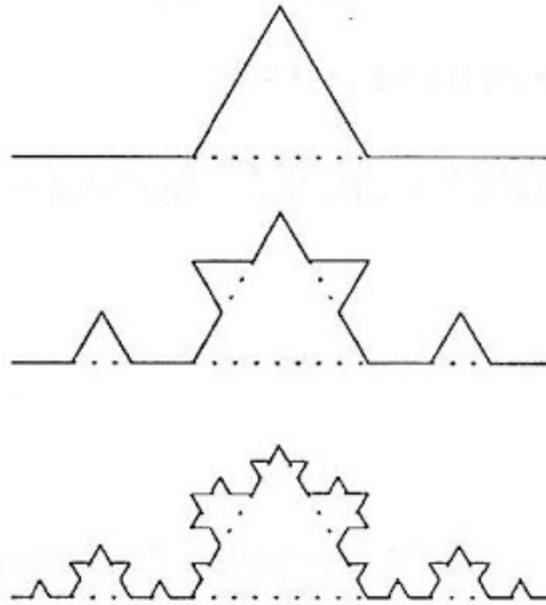


Figura 11 – Formação da Curva de Koch em suas primeiras iterações

Fonte: (MOREIRA, 2017)

O desenvolvimento da "Ilha de Koch" é iniciado com um triângulo equilátero, como no triângulo de Sierpinski. A priori, divide-se cada lado do triângulo em três partes iguais e se constrói, sobre cada um dos segmentos médios, um novo triângulo equilátero. Ao se repetir o processo indefinidamente, é obtida a figura "Ilha de Koch".

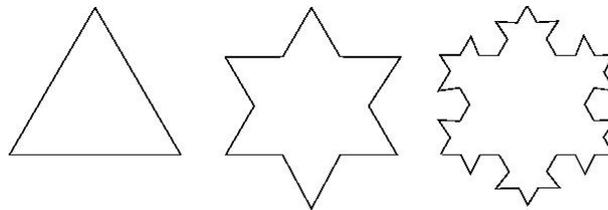


Figura 12 – Formação do Estrela de Koch com suas diversas iterações

Fonte: (MOREIRA, 2017)

### 3.3.4 Conjunto de Júlia

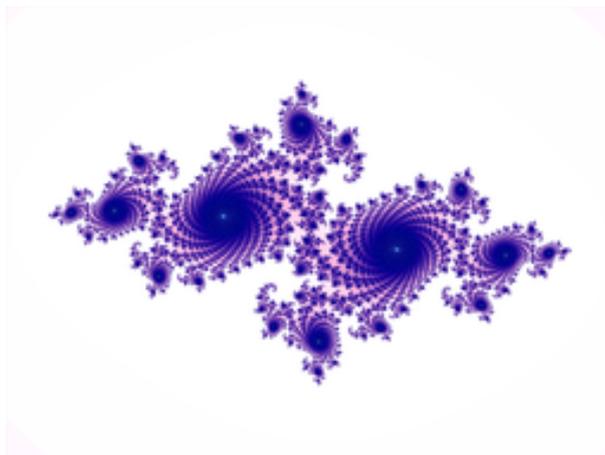


Figura 13 – Fractal pertencente ao Conjunto de Julia

Fonte: ([CONJUNTO...](#), )

O Conjunto de Júlia é um exemplo clássico de fractal com auto-semelhança aproximada ou estatística, o qual surgiu a partir do estudo acerca de processos iterativos com números complexos, estudos estes apresentados por Gaston Julia e Pierre Fatou em 1918, sem o recurso de computadores.

## 4 Simulação de antenas de Microfita com Geometria Quase Fractal

Este capítulo objetiva analisar o comportamento das antenas de microfita utilizando a geometria quase fractal do tapete de Sierpinski.

### 4.1 Software

*Ansys High Frequency Eletrocmagnetic Field Simulation Software* (HFSS) é um software destinado à simulação de produtos eletrônicos de alta frequência, como antenas ou componentes de microondas (conectores, filtros, interconectores de alta velocidade). É utilizado em todo o mundo para o desenvolvimento de produtos como radares, satélites e produtos IoT. Esse software oferece métodos e ferramentas para solucionar problemas encontrados durante os mais variados projetos, o que o torna complexo e de difícil utilização. (ANSOFT..., )



Figura 14 – Ícone do software HFSS Versão 13.0.0

Fonte: Autor (2019)

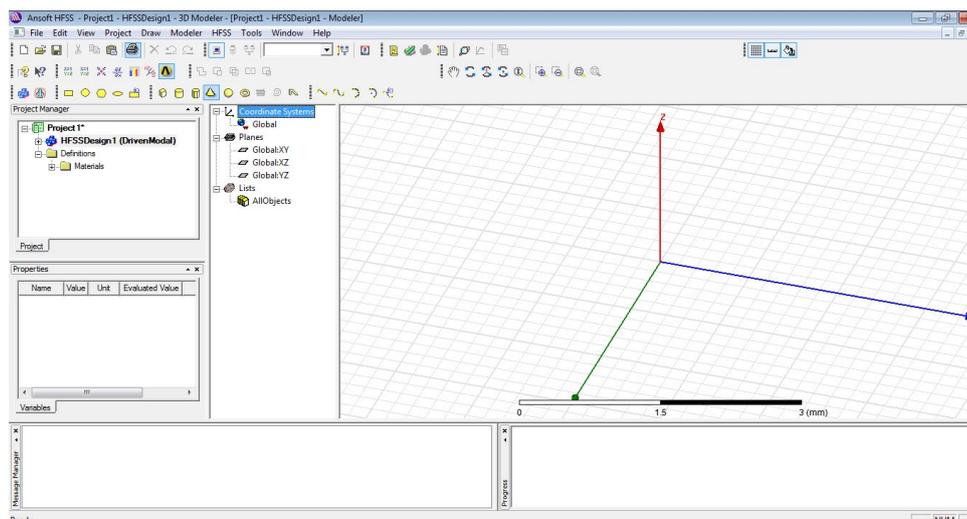


Figura 15 – Página inicial de projetos do software HFSS

Fonte: Autor (2019)

O kit de ferramentas de design de antenas disponibilizado pelo software HFSS é um utilitário autônomo que automatiza a criação de geometria, configuração das soluções e relatórios de pós-processamento para mais de 50 tipos de antenas, entretanto não contempla as de microfita com formatos fractais. Em razão disso, faz-se necessário utilizar o kit para desenvolver uma antena de microlinha retangular, e a posteriori, realizar manualmente ou por meio de automatização as iterações necessárias para se obter esses dispositivos não convencionais. (ANSYS..., )

Além disso, a união do software HFSS com o seu Kit de ferramentas permite aos engenheiros e projetistas analisarem diferentes tipos de antenas, como também auxilia novos usuários a aprender a manuseá-lo. Em virtude disso, foram utilizadas essas ferramentas para se obter as simulações e resultados apresentados neste trabalho.

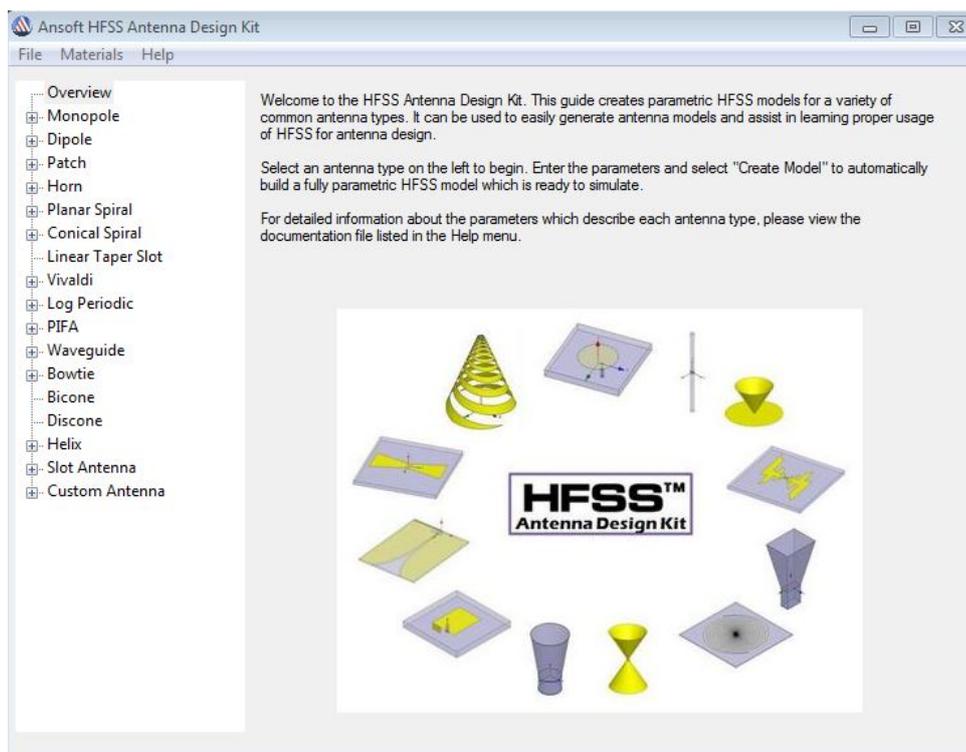


Figura 16 – Kit de ferramentas fornecido pela HFSS para o projeto de antenas

Fonte: Autor (2019)

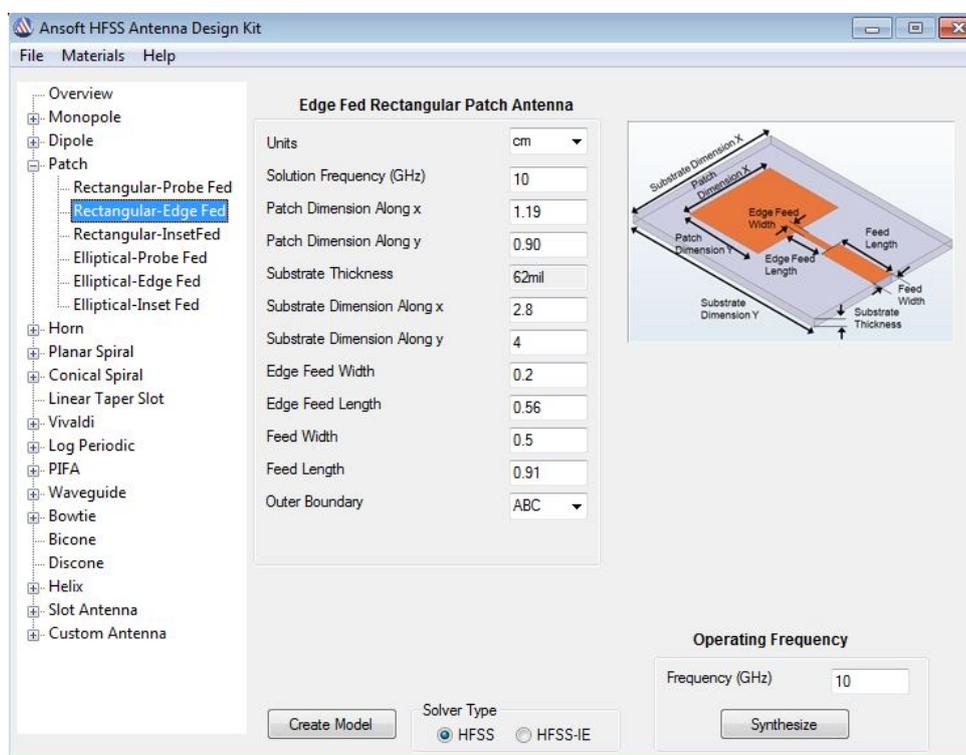


Figura 17 – Seção do kit de ferramentas para o projeto de antenas de microfita

Fonte: Autor (2019)

## 4.2 Experimentos e análise dos resultados

Com o intuito de investigar o comportamento da antena de microfita com a geometria quase fractal tapete de Sierpinski e de consolidar os resultados obtidos, foram simulados três dispositivos projetados para atuarem em diferentes faixas de frequência. Além disso, cada antena foi analisada nos seus três primeiros níveis de iteração necessários para se obter a figura fractal.

Entretanto, apesar desses dispositivos serem projetados para atuarem em diferentes faixas de frequências, o procedimento para se obter os diferentes níveis de iteração foram idênticos. Portanto, serão analisadas separadamente três antenas cujas frequências de atuação serão 5 GHz, 10 GHz e 15 GHz, respectivamente.

### 4.2.1 Configurações e projeto das antenas

Primeiramente, as antenas foram obtidas a partir do kit de ferramentas de projeto de antenas do software HFSS, após, foi selecionada a opção *Patch Rectangular-Edge-Fed*, o que resultou na antena de microfita retangular. Em ressalva, como ainda não ocorreu nenhum processo iterativo, essa antena será considerada como de microfita com geometria fractal tapete de Sierpinski de nível zero.

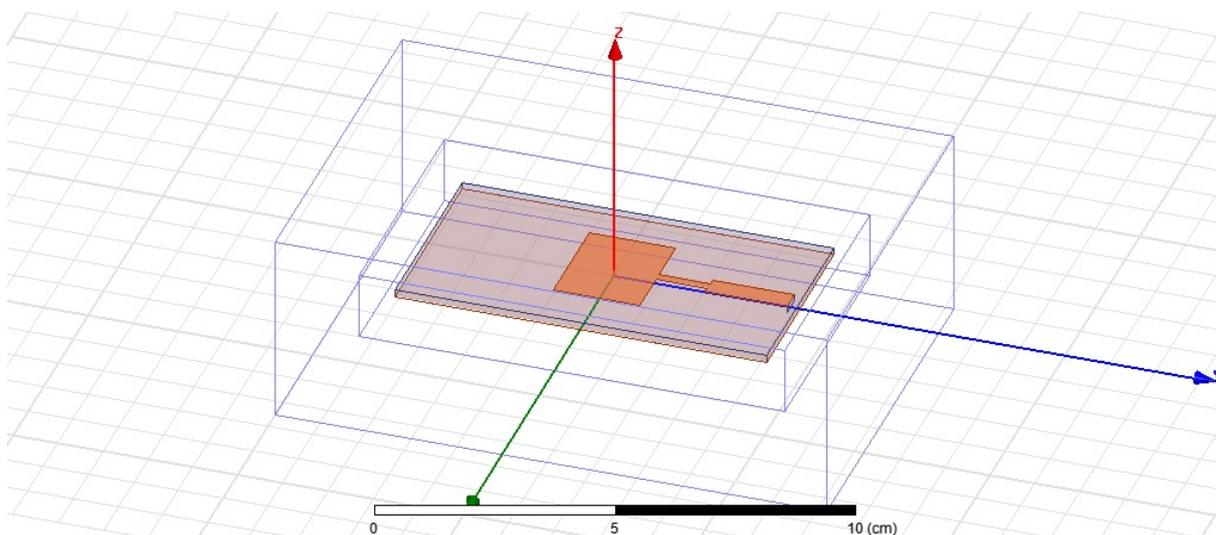


Figura 18 – Projeto de antena de microfita retangular (nível 0)

Fonte: Autor (2019)

O *patch* de formato retangular é dividido em nove retângulos idênticos. Posteriormente, é eliminado o retângulo central. Desse modo, restam apenas oito retângulos, o que resulta na antena de microfita com geometria tapete de Sierpinski de nível um, Figura 19.

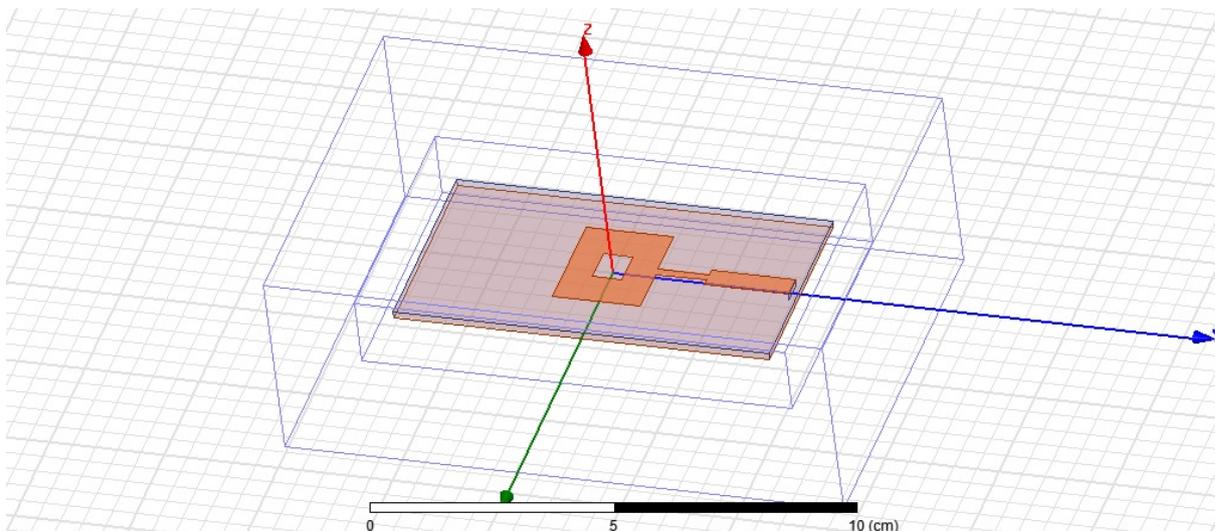


Figura 19 – Projeto de antena de microfita no primeiro nível de iteração para se obter a figura fractal tapete de Sierpinski

Fonte: Autor (2019)

A repetição do procedimento supracitado em cada um dos oito novos retângulos resultará na antena de microfita com geometria fractal tapete de Sierpinski de nível dois, Figura 20.

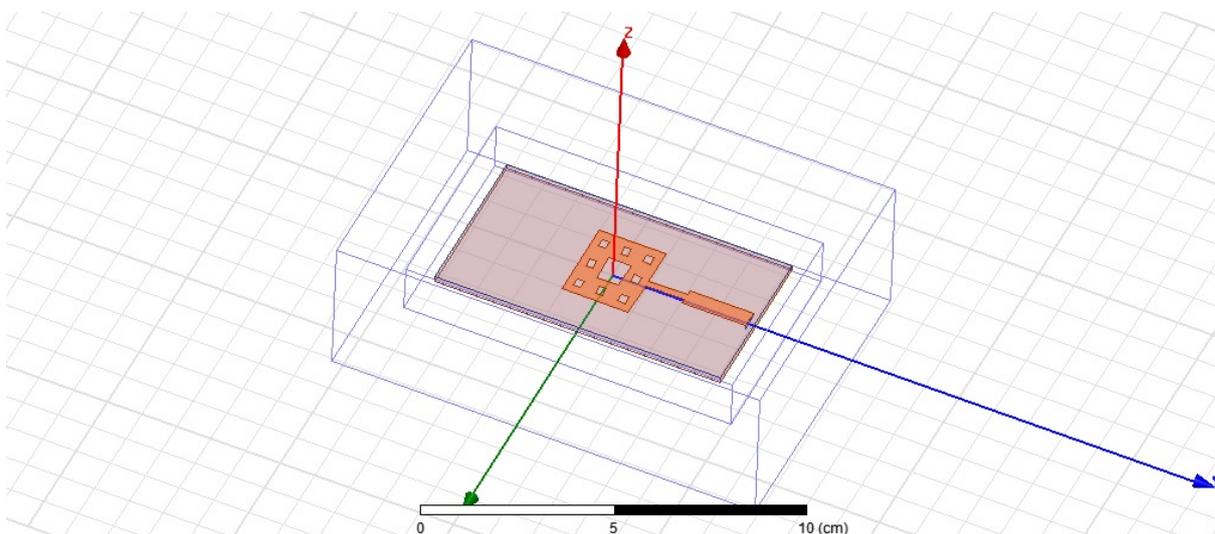


Figura 20 – Projeto de antena de microfita no segundo nível de iteração para se obter a figura fractal tapete de Sierpinski

Fonte: Autor (2019)

Apesar da necessidade de realizar o processo iterativo sucessivamente para que o grau de detalhamento não diminua quando se examina apenas uma pequena porção

arbitrária da figura (Estrutura fina), este trabalho se limita a analisar as antenas nos três primeiros níveis de iteração.

Essa limitação se dá pelo fato de que o software HFSS calcula e apresenta os campos eletromagnéticos, que são gerados na estrutura por dois diferentes métodos: o primeiro a partir da solução das equações de Maxwell por meio do Método dos Elementos Finitos e o segundo, por meio da Equação Integral de Campo Elétrico por meio do Método da Equação Integral. Entretanto, ambos os métodos supracitados utilizam grande quantidade de cálculos computacionais, o que se torna um obstáculo ao se analisar estruturas complexas, pois é exigido um enorme custo computacional. Em virtude disso, é necessária a utilização de máquinas com muita memória RAM acoplada, pois, caso contrário, a análise pode ser interrompida durante a simulação. (ELÉTRICA; RIBEIRO, 2016)

#### 4.2.2 Resultados obtidos a partir da simulação da primeira antena

A primeira antena a ser analisada foi projetada para atuar na frequência de 5 GHz, cujos resultados referentes às perdas de retorno para os três diferentes níveis de iteração estão ilustrados abaixo.



Figura 21 – Perda de retorno da primeira antena com nível de iteração 0

Fonte: Autor (2019)

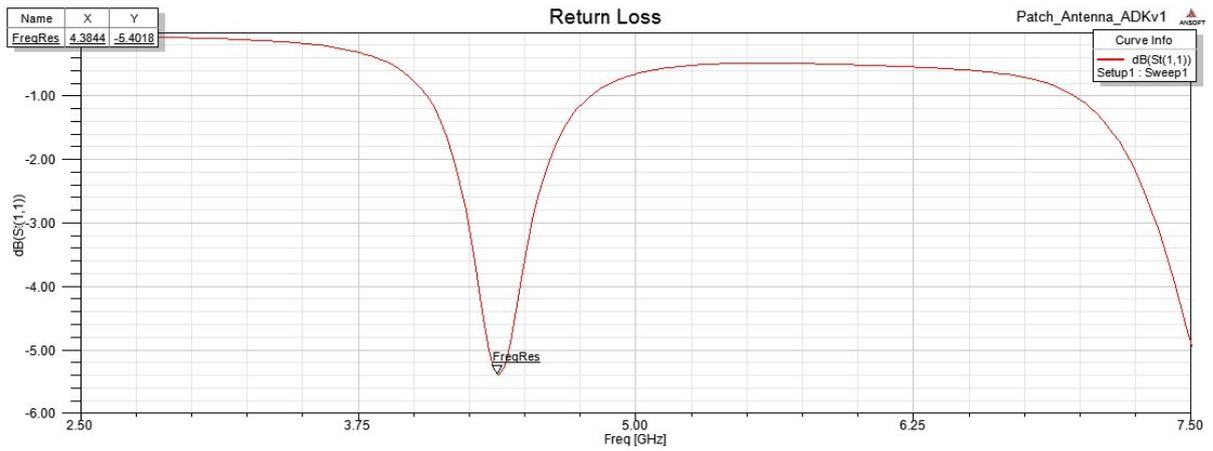


Figura 22 – Perda de retorno da primeira antena com nível de iteração 1

Fonte: Autor (2019)

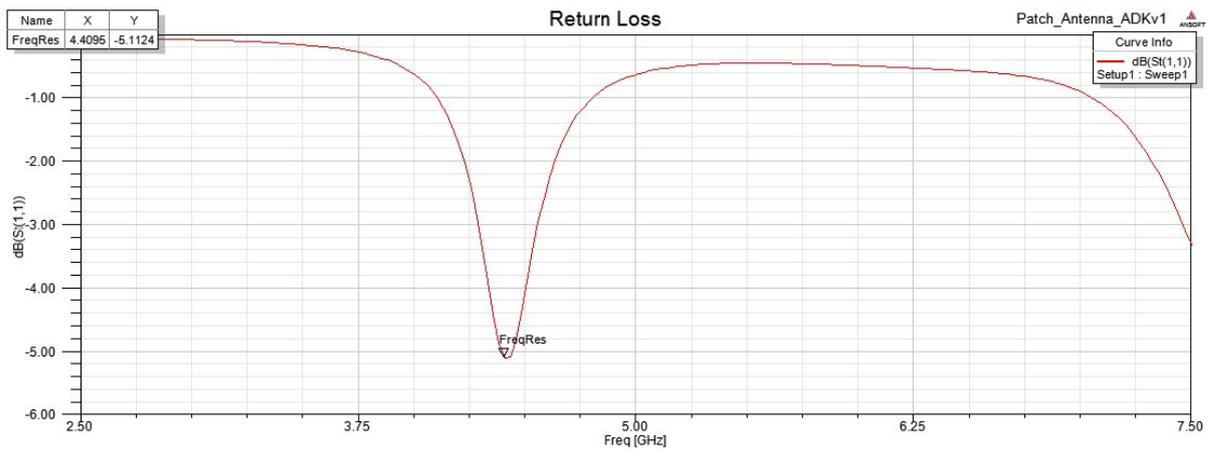


Figura 23 – Perda de retorno da primeira antena com nível de iteração 2

Fonte: Autor (2019)

Após analisar os gráficos de perda de retorno obtidos durante as simulações efetuadas no software HFSS, é possível reunir as informações na Tabela 02.

Nível de Iteração	Freq. de Ressonância	Perda de Retorno
0	4.8618 GHz	-10.9879 dB
1	4.3844 GHz	-5.4018 dB
2	4.4095 GHz	-5.1124 dB

Tabela 2 – Resultados obtidos a partir da simulação das diferentes iterações para a primeira antena analisada

Verifica-se que, na antena de iteração 0, há uma frequência de ressonância próxima à esperada. Ademais, ao se comparar com a antena de nível 1, é perceptível uma redução significativa da frequência de ressonância (0,4774 GHz), também ocorre um aumento considerável da perda de retorno, fator esse negativo uma vez que chega a valores superiores a -10 dB.

Entretanto, o fenômeno descrito no parágrafo acima não ocorre ao se comparar as antenas de iteração de níveis 1 e 2, visto que as frequências de ressonância permanecem próximas (0,02510 GHz), porém, ocorre um aumento da perda de retorno (0,2894 dB) semelhante à comparação das antenas de níveis 0 e 1 de iteração.

Outro parâmetro a ser considerado para uma análise mais aprofundada da antena é o seu ganho, cujos resultados referentes a essa característica estão ilustrados abaixo.



Figura 24 – Ganho em 3D da antena número 01 com nível de iteração 0

Fonte: Autor (2019)



Figura 25 – Ganho em 3D da antena número 01 com nível de iteração 1

Fonte: Autor (2019)



Figura 26 – Ganho em 3D da antena número 01 com nível de iteração 2

Fonte: Autor (2019)

Ao se comparar as antenas de iteração 0 e 1, é possível verificar que ocorre um aumento do ganho máximo da antena, como também um aumento da diretividade, característica esta claramente notável ao se observar a compressão das figuras 24 e 25. Todavia, fenômeno semelhante não é observado ao se comparar o ganho máximo das antenas de iteração 1 e 2, visto que ocorre uma variação de apenas 0.0889 dB.

Portanto, com base nos resultados obtidos por meio do HFSS, é possível verificar que as antenas de níveis 1 e 2 possuem perda de retorno e ganho máximo maiores que a de nível 0. Em razão disso, é possível concluir que as três antenas são atrativas, pois ao mesmo tempo em que ocorre uma maior perda de retorno o ganho também aumenta.

### 4.2.3 Resultados obtidos a partir da simulação da segunda antenna

A segunda antenna a ser analisada foi projetada para atuar na frequência de 10 GHz, cujos resultados referentes às perdas de retorno para os três diferentes níveis de iteração estão ilustrados abaixo.

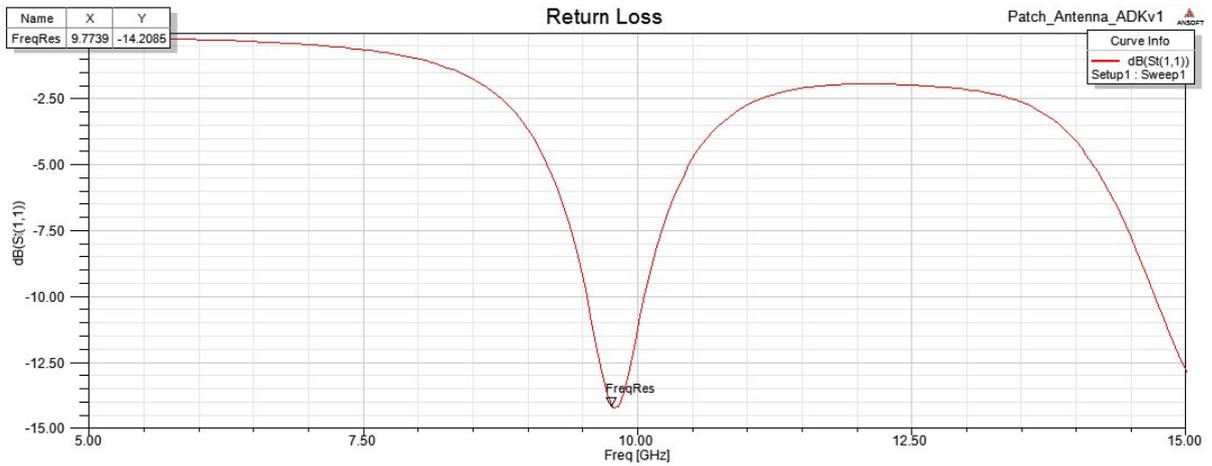


Figura 27 – Perda de retorno da segunda antenna com nível de iteração 0

Fonte: Autor (2019)

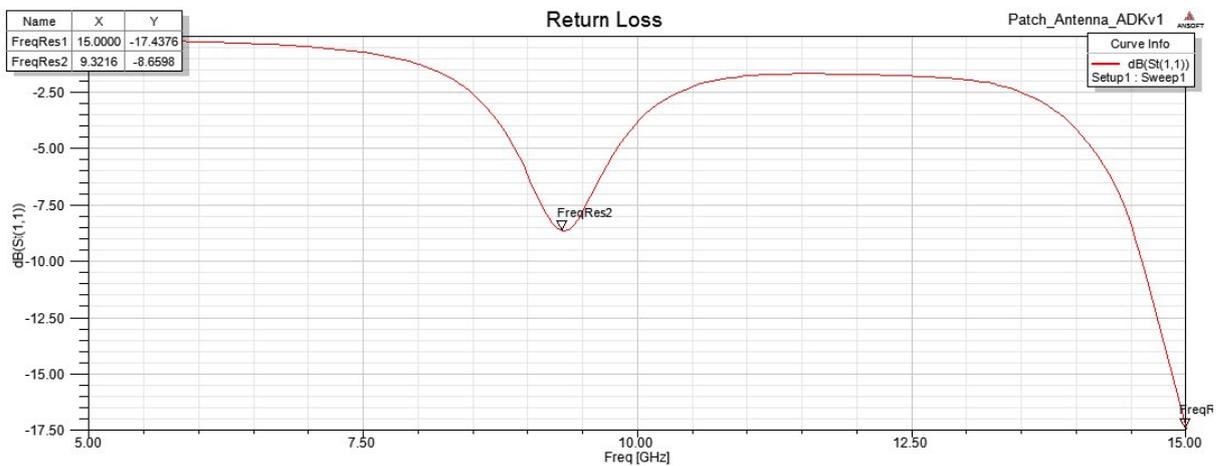


Figura 28 – Perda de retorno da segunda antenna com nível de iteração 1

Fonte: Autor (2019)

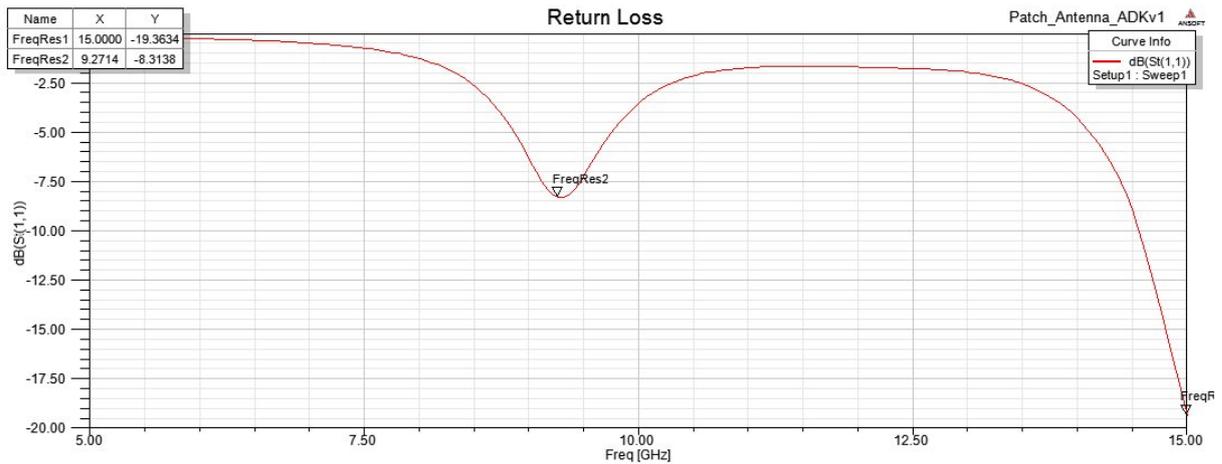


Figura 29 – Perda de retorno da segunda antena com nível de iteração 2

Fonte: Autor (2019)

Após analisar os gráficos de perda de retorno obtidos durante as simulações efetuadas no software HFSS, é possível reunir as informações na Tabela 03.

Nível de Iteração	Freq. de Ressonância	Perda de Retorno
0	9.7739 GHz	-14.2085 dB
1	9.3216 GHz	-8.6598 dB
2	9.2714 GHz	-8.3138 dB

Tabela 3 – Resultados obtidos a partir da simulação das diferentes iterações da segunda antena analisada

Verifica-se que, na antena de iteração 0, há uma frequência de ressonância próxima à esperada. Ainda, ao se comparar com a antena de nível 1, é perceptível uma redução significativa da frequência de ressonância (0,4523 GHz), e também ocorre um aumento considerável da perda de retorno em 5,5487 dB. Entretanto, o mesmo compartimento não é visto ao se comparar as antenas de níveis 1 e 2, uma vez que ocorre uma pequena variação na frequência de ressonância e na perda de retorno.

Outro parâmetro a ser considerado para uma análise mais aprofundada da antena é o seu ganho, os resultados referentes a essa característica estão ilustrados abaixo.



Figura 30 – Ganho em 3D da antena número 02 com nível de iteração 0

Fonte: Autor (2019)



Figura 31 – Ganho em 3D da antena número 02 com nível de iteração 1

Fonte: Autor (2019)



Figura 32 – Ganho em 3D da antena número 02 com nível de iteração 2

Fonte: Autor (2019)

Ao se comparar as variações percebidas no ganho das antenas, é possível verificar que ocorre o mesmo efeito percebido para a primeira antena analisada.

#### 4.2.4 Resultados obtidos a partir da simulação da terceira antena

A terceira antena a ser analisada foi projetada para atuar na frequência de 15 GHz, cujos resultados referentes às perdas de retorno para os três diferentes níveis de iteração estão ilustrados abaixo.

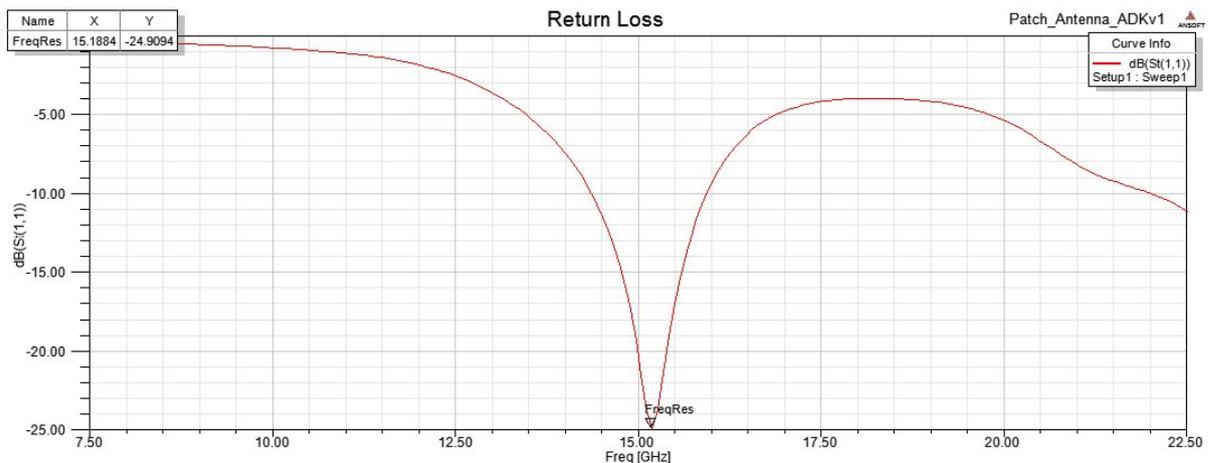


Figura 33 – Perda de retorno da terceira antena com nível de iteração 0

Fonte: Autor (2019)

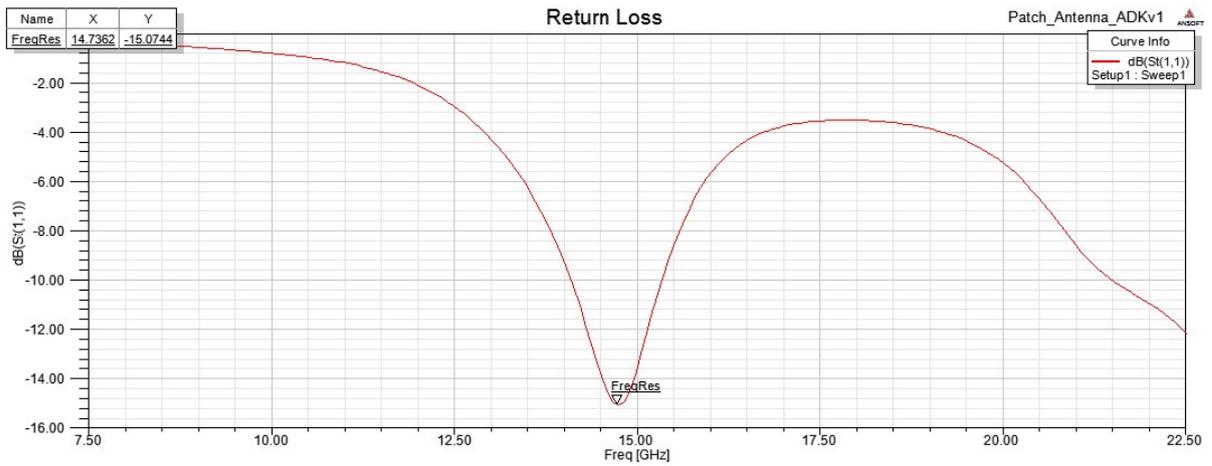


Figura 34 – Perda de retorno da terceira antena com nível de iteração 1

Fonte: Autor (2019)

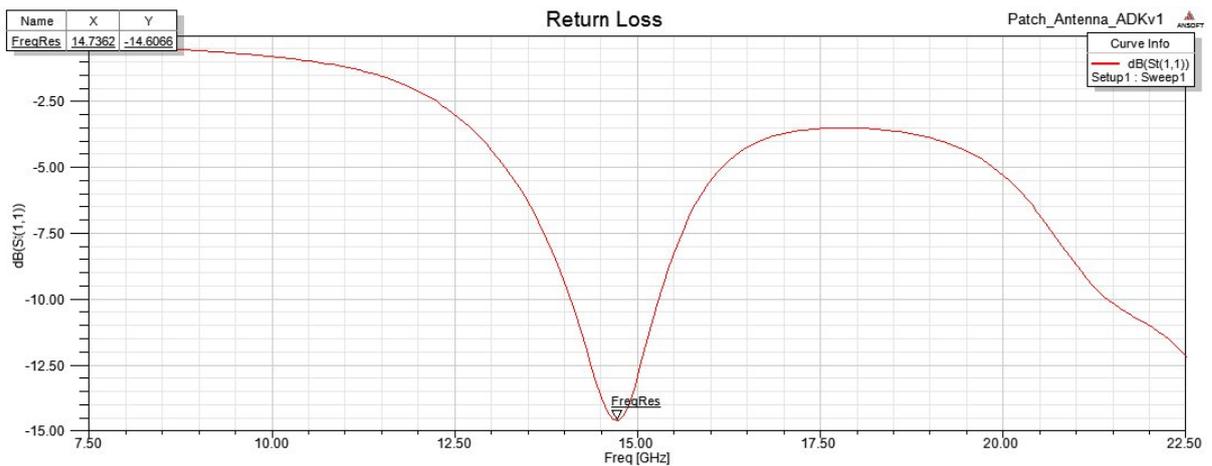


Figura 35 – Perda de retorno da terceira antena com nível de iteração 2

Fonte: Autor (2019)

Após analisar os gráficos de perda de retorno obtidos durante as simulações efetuadas no software HFSS, é possível reunir as informações na Tabela 04.

Nível de Iteração	Freq. de Ressonância	Perda de Retorno
0	15.1884 GHz	-24.9094 dB
1	14.7362 GHz	-15.0744 dB
2	14.7362 GHz	-14.6066 dB

Tabela 4 – Resultados obtidos a partir da simulação das diferentes iterações para a terceira antena analisada

Observa-se que, para as antenas de iteração 0 e 1, ocorre uma redução significativa na frequência de ressonância (0.4522 GHz) e na perda de retorno (9.835 dB). Entretanto, ao se analisar os gráficos das antenas de iteração 1 e 2, é possível verificar que a frequência de ressonância permanece a mesma e ocorre um aumento da perda de retorno de 0.4678 dB.

Ademais, outro parâmetro a ser considerado para uma análise mais aprofundada da antena é o seu ganho, os resultados referentes a essa característica estão ilustrados abaixo.



Figura 36 – Ganho em 3D da antena número 03 com nível de iteração 0

Fonte: Autor (2019)



Figura 37 – Ganho em 3D da antena número 03 com nível de iteração 1

Fonte: Autor (2019)

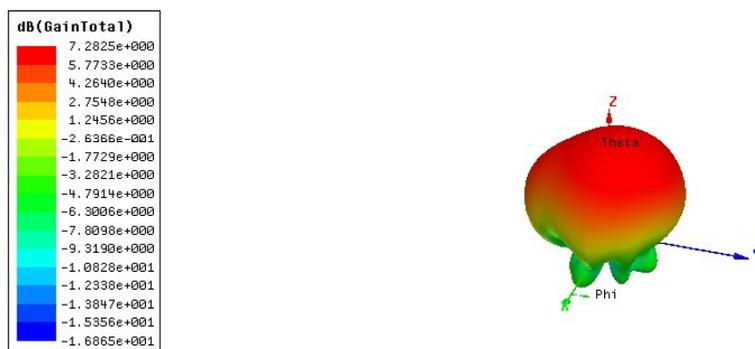


Figura 38 – Ganho em 3D da antena número 03 com nível de iteração 2

Fonte: Autor (2019)

Ao se analisar as variações percebidas no ganho das antenas é possível verificar um efeito semelhante ao percebido para o primeiro e segundo equipamento analisado.

## 5 Conclusão

As antenas são, de modo geral, estruturas intermediárias entre o espaço livre e as linhas de transmissão. Em sistemas de comunicação sem fio, a antena é um dos elementos mais cruciais, uma vez que um adequado projeto desses dispositivos é capaz de promover um bom desempenho para o sistema. Outrossim, um dos dispositivos muito conhecidos são as antenas de microfita, uma vez que apresentam interessantes propriedades, como baixo custo e facilidade de acomodação em pequenos espaços.

Neste trabalho, foram estudadas as antenas de microfita que possuem formatos fractais em sua estrutura. Ademais, foi verificado que a análise desses dispositivos ainda encontra limitações computacionais e dificuldade de construção prática de qualidade como seus maiores obstáculos.

Os resultados obtidos a partir das simulações apresentadas nesse trabalho podem ser compilados na tabela 5. Por fim, é primordial considerar que foi utilizado o mesmo procedimento para a obtenção das diferentes iterações nas três antenas analisadas.

Comparativo das antenas	Nível 0 e 1		Nível 1 e 2	
	Freq. de Resson	Perda de Retorno	Freq. de Resson	Perda de Retorno
<b>1ª antena</b>	0.4774 GHz	5.5861 dB	0.0251 GHz	0.2894 dB
<b>2ª antena</b>	0.4523 GHz	5.5487 dB	0.0502 GHz	0.3460 dB
<b>3ª antena</b>	0.4522 GHz	9.835 dB	0 GHz	0.4678 dB
<b>Média</b>	0.4606 GHz	6.9899 dB	0.0251 GHz	0.3677 dB

Tabela 5 – Comparativo da variação dos resultados obtidos das três antenas simuladas para os diferentes níveis de iteração

Ao analisar a Tabela 5, é nítido que apesar das antenas serem projetadas para atuarem em diferentes frequências, esses dispositivos apresentaram características semelhantes ao se comparar os resultados obtidos nos primeiros níveis de iteração. Por exemplo, ao se comparar a frequência de ressonância das três antenas dos níveis 0 e 1 se tem uma redução média de 0.4606 GHz.

Ademais, outro parâmetro que foi considerado para uma análise mais aprofundada da antena nesse trabalho foi o ganho, cujo resultados para as três antenas estudadas estão explícitos na figura 39.

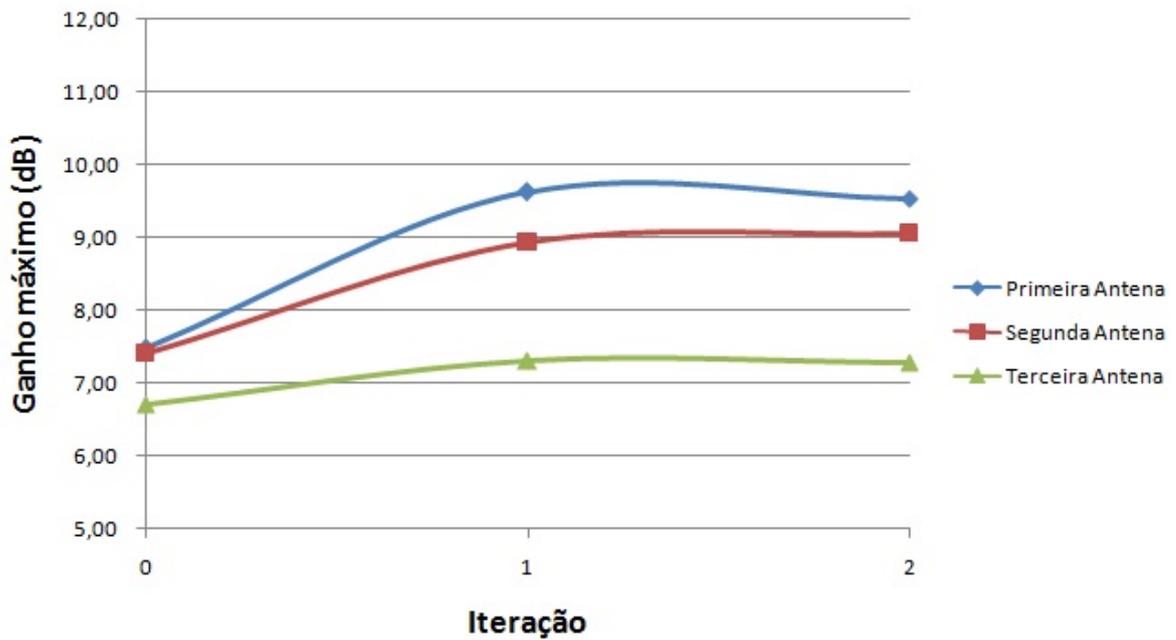


Figura 39 – Gráfico do ganho máximo das três antenas

Fonte: Autor (2019)

Com base no gráfico apresentado, é possível concluir que há uma padronização na relação de iterações com o ganho máximo obtido nas antenas analisadas, como também na relação de iteração com a perda de retorno. Essa padronização é de extrema importância para que seja possível o estudo e o desenvolvimento desses dispositivos durante a graduação em cursos com ênfase em telecomunicações.

Recomenda-se que, em pesquisas futuras, sejam verificados se os padrões encontrados nesse trabalho se repetem para as antenas projetadas para atuarem em frequências diferentes das simuladas. Além disso, espera-se que este trabalho sirva como incentivo e referência para futuras análises que envolvem as antenas de microfita com geometria quase fractal tapete de Sierpinski.

# Referências

- ANSOFT HFSS Design kit Design Parameters. <[http://www.edatop.com/down/faq/rf/02\\_Design\\_Parameters.pdf](http://www.edatop.com/down/faq/rf/02_Design_Parameters.pdf)>. Acessado em: 20/06/2019.
- ANSYS HFSS. <<https://www.ansys.com/products/electronics/ansys-hfss>>. Acessado em: 20/06/2019.
- ASSIS, T. A. de et al. Geometria fractal: propriedades e características de fractais ideais. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 30, n. 2, p. 2304.1–2304.10, 2009.
- BALANIS, C. A. **Antenna theory**. [S.l.: s.n.], 2005. v. 25. 812–813 p. ISSN 2168-0329. ISBN 9786468600.
- BEMFICA, A.; ALVES, C. Fractais: progressão e série geométrica Uma metodologia de ensino. p. 6–25, 2010.
- CONJUNTO de Júlia. <[https://pt.wikipedia.org/wiki/Conjunto\\_de\\_Julia](https://pt.wikipedia.org/wiki/Conjunto_de_Julia)>. Acessado em: 20/06/2019.
- DE, R. N. D. NOVAS CONFIGURAÇÕES DE MONOPOLOS PLANARES QUASE-FRACTAIS PARA SISTEMAS DE Novas Configurações de Monopulos Planares Quase-Fractais para Sistemas de Comunicações Móveis. 2008.
- ELÉTRICA, P.-g. E. M. E.; RIBEIRO, D. L. Utilização de antena fractal de microfita em projetos de estruturas eletricamente pequenas e independentes da frequência. 2016.
- GEOMETRIA Fractal - Uma visão geral dos seus aspectos. <<http://www.ic.uff.br/~aconci/aula1.html>>. Acessado em: 20/06/2019.
- LABORATÓRIO DE ENSINO DE MATEMÁTICA COMO AMBIENTE MOTIVADOR NA CONSTRUÇÃO DO CONHECIMENTO PELO ALUNO DO ENSINO MÉDIO. <[http://www.diaadiaeducacao.pr.gov.br/portals/cadernospe/pdebusca/producoes\\_pde/2013/2013\\_ufpr\\_mat\\_pdp\\_marcia\\_viviane\\_barbetta\\_manosso.pdf](http://www.diaadiaeducacao.pr.gov.br/portals/cadernospe/pdebusca/producoes_pde/2013/2013_ufpr_mat_pdp_marcia_viviane_barbetta_manosso.pdf)>. Acessado em: 20/06/2019.
- LACERDA, D. C.; JUNIOR, A. C. d. S. Projeto e Construção de Antena de Microfita para Sistema Móvel Celular. 2008.
- MOREIRA, V. da Silva Sampaio. Geometria Fractal na Educação Básica. 2017.
- NUNES, R. S. R. Geometria Fractal e Aplicações. p. 1–78, 2006.
- UCB2018: O tapete de Sierpinski é construído removendo-se sucessivamente o quadrado central. <<https://www.indagacao.com.br/2018/08/ucb-2018-o-tapete-de-sierpinski-e-construido-removendo-se-sucessivamente-o-quadrado-central.html>>. Acessado em: 20/06/2019.