

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA POLITÉCNICA

STÉFANO ALBINO VILELA REZENDE

**Antenas fractais otimizadas por algoritmo genético para aplicação em tele-
fonia móvel de quinta geração**

São Paulo
2021

STÉFANO ALBINO VILELA REZENDE

Antenas fractais otimizadas por algoritmo genético para aplicações em telefonia móvel de quinta geração

Exame de qualificação apresentado à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica

Área de Concentração: Microeletrônica
Orientadora: Profa. Dra. Fatima Salete Correra

São Paulo
2021

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Transição entre linha de transmissão e antena ³	12
Figura 2 – Representações de uma antena em (a) Impedância (Círculo equivalente de Thevenin) e (b) Admitância (círculo equivalente de Norton) ³	13
Figura 3 – (a) Lóbulos de radiação e larguras de feixe de um diagrama de antena. (b) Projeção linear do diagrama de potência e seus lóbulos associados e larguras de feixe ¹	17
Figura 4 – Configurações de antenas de microfita alimentadas (a) Por sonda coaxial; (b) Por linha de transmissão de microfita; (c) Por acoplamento por proximidade; (d) Por acoplamento por abertura.....	21
Figura 5 – Configuração de uma antena de placa de microfita.	22
Figura 6 – Exemplos de formatos geométricos de placas em antenas de microfita ⁴	23
Figura 7 – Configuração de uma antena dipolo impresso.	25
Figura 8 – Configurações de antenas impressas de fenda (a) Com alimentação por linha de transmissão de microfita; (b) Com alimentação por guia de onda coplanar.....	26
Figura 9 – Configurações de antenas de ondas viajantes de microfita.	28
Figura 10 – A curva de Koch: (a) método de construção e (b) o resultado de um de três lados do triângulo original depois de diversas iterações ²⁰	29
Figura 11 – A construção do Conjunto de Cantor. ²⁰	30
Figura 12 – Carpete de Sierpinski: (a) Quadrado gerador; (b) Iterações 1, 2 e 3 ¹⁸	31
Figura 13 – A construção da Gaxeta de Sierpinski. ¹⁹	31
Figura 14 – Segundo estágio de construção da Esponja de Sierpinski. ²⁰	32
Figura 15 – Fluxograma do algoritmo genético.	36
Figura 16 – Antena de placa dividida em 16 células.....	45
Figura 17 – Exemplos de formatos de placas ao longo do processo de otimização.....	45
Figura 18 – Gráfico com os melhores valores da função performance (em laranja) e a média dos valores da função de todos os cromossomos da geração (em azul) ao longo das gerações.....	47
Figura 19 – Antena com melhor performance após otimização com GA. (a) Estrutura da Antena, (b) Coeficiente de reflexão por frequência.....	48
Figura 20 – Diagramas de radiação da antena com melhor performance após otimização com GA nas frequências de 2,53 GHz (a) e 4,72 GHz (b). A diretividade está representada em azul e o ganho em vermelho. O corte do gráfico à esquerda é em $\phi = 0^\circ$ ou seja no plano xz e o da direita em $\theta = 60^\circ$	49

Figura 21 – Distribuição de Corrente ao longo da estrutura da antena com melhor performance após otimização com GA. (a) Em 2,5 GHz e (b) em 4,72 GHz.	50
Figura 22 – Antena sem os elementos radiadores desconectados da alimentação. (a) Estrutura da Antena, (b) Coeficiente de reflexão por frequência.	52
Figura 23 – Diagramas de radiação da antena sem os elementos radiadores desconectados da alimentação nas frequências de 2,53 GHz (a) e 4,72 GHz (b). A diretividade está representada em azul e o ganho em vermelho. O corte do gráfico à esquerda é em $\varphi = 0^\circ$ ou seja no plano xz e o da direita em $\theta = 60^\circ$	53
Figura 24 – Antenas fractais desenhadas através de linguagem de programação AEL.	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dimensões de autossimilaridade dos fractais.	34
Tabela 2 – Exemplo de cruzamento de cromossomos.....	38
Tabela 3 – Faixas de Frequênci da FR1.....	40
Tabela 4 – Cronograma previsto de atividades	42

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

5G NR	<i>5G New Radio</i>
ADS	<i>Advanced Design System</i>
AEL	<i>Application Extension Language</i>
CAD	<i>Computer-Aided Design</i>
CST	<i>Computer Simulation Technology</i>
EM-3D	<i>Electromagnetic three dimensional</i>
FEM	<i>Finite Element Method</i>
FR1	Faixa de Frequência 1 da quinta geração de telefonia móvel (617 a 7125 MHz)
FR2	Faixa de Frequência 2 da quinta geração de telefonia móvel (24,25 a 52,6 GHz)
FR4	<i>Flame Retardant 4</i>
GA	<i>Genetic Algorithm</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
ITM-2020	<i>International Mobile Telecommunications-2020</i>
LFPN	Largura de Feixe de Primeiro Nulo
LFMP	Largura de Feixe de Meia Potência
LME	Laboratório de Microeletrônica
M2M	<i>Machine-to-Machine</i>
USP	Universidade de São Paulo

LISTA DE SÍMBOLOS

S₁₁	Coeficiente de Reflexão
%LB	Largura de Banda fracionária da antena
Δf	Largura de banda da antena
f₀	Frequência Central da banda
f_s	Frequência Superior da banda
f_i	Frequência Inferior da banda
Z	Impedância de Entrada
V₀	Fonte de Tensão
Y	Admittância
I₀	Fonte de Corrente
R_{perd}	Resistência que representam perdas na estrutura da antena, sejam elas condutivas ou dielétricas.
G_{perd}	Condutância que representam perdas na estrutura da antena, sejam elas condutivas ou dielétricas.
X	Reatância
B	Susceptância
R_{irrad}	Resistência associada a potência irradia pela antena para o meio que a envolve.
G_{irrad}	Condutância associada a potência irradia pela antena para o meio que a envolve
V_{ent}	Tensão da fonte que alimenta a antena
I_{ent}	Corrente da fonte que alimenta a antena
Γ	Coeficiente de Reflexão
Z₀	Impedância característica do alimentador
TOE	Taxa de Onda Estacionária
R_{cd}	Distância de Campo Distante.

D	Maior Dimensão da Antena.
λ	Comprimento de Onda.
RA	Razão Axial
η_p	Eficiência de Polarização
e_c	Eficiência Condutiva
e_d	Eficiência Dielétrica
θ	Ângulo da Coordenada Esférica, definido por: $\theta = \arctan \frac{\sqrt{x^2+y^2}}{z}$
ϕ	Ângulo da Coordenada Esférica, definido por: $\phi = \arctan \frac{y}{x}$
G (θ, ϕ)	Ganho da Antena numa dada direção
U (θ, ϕ)	Intensidade de radiação numa dada direção
P_{rad}	Potência Irradiada
D (θ, ϕ)	Diretividade da antena numa dada direção
G₀	Ganho Máximo da Antena
G_{abs} (θ, ϕ)	Ganho Absoluto, considerando as perdas por descasamento
λ_0	Comprimento de Onda de Operação da Antena
h	Espessura do substrato
ϵ_r	Constante Dielétrica
d	Dimensão de um objeto geométrico
s	Tamanho de uma dimensão de um conjunto
k	Qualquer número inteiro positivo
N(s)	Número de subconjuntos no qual o conjunto foi dividido
\mathbb{R}^n	Conjunto dos Números Reais de n dimensões
ln	Logaritmo Natural
N_{par}	Número de Parâmetros (genes) contidos num cromossomo.
p₁, p₂, ..., p_N	Sequência de parâmetros (genes) no cromossomo

N_{pbits}	Número de bits por parâmetro (gene)
N_{bits}	Número de bits do cromossomo
M	Número de cromossomos por geração
f	Função performance do Algoritmo Genético

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA	4
2 OBJETIVOS	6
3 METODOLOGIA DE TRABALHO	8
4 PRINCÍPIOS TEÓRICOS	11
4.1 PRINCIPIOS FUNDAMENTAIS DE ANTENAS	11
4.1.1 Largura de Banda	11
4.1.2 Impedância de Entrada	12
4.1.3 Polarização	15
4.1.4 Diagrama de radiação	17
4.1.5 Ganho	18
4.2 ANTENAS DE MICROFITA	19
4.3 GEOMETRIA FRACTAL	28
4.3.1 Fractais de estrutura recorrente simples	29
4.3.2 Dimensão fractal e dimensão de Hausdorff	32
4.3.3 Antenas Fractais	34
4.4 TECNICAS DE OTIMIZAÇÃO E ALGORITMOS GENETICOS	35
4.5 ESPECIFICAÇÕES DA QUINTA GERAÇÃO DA TELEFONIA MOVEL	39
5 MATERIAIS E MÉTODOS	41
6 CRONOGRAMA DE EXECUÇÃO	42
7 DESENVOLVIMENTO DE ATIVIDADES	43
7.1 ATIVIDADES CONCLUÍDAS	43
7.2 ATIVIDADES EM ANDAMENTO	53
7.3 ATIVIDADES FUTURAS	56
8 SUMÁRIO ESTRUTURADO DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO	57
REFERÊNCIAS	59

1 INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

O desenvolvimento tecnológico no campo das comunicações sem fio vem instigando cada vez mais o surgimento de novas aplicações.

Dentre essas aplicações a mais presente nas vidas de grande parte da população é a telefonia móvel. Anteriormente usada exclusivamente para transporte de voz, hoje é amplamente empregada para acesso à internet. Sendo a utilização para acesso a vídeos responsável por mais da metade do tráfego de dados ano a anos desde 2017⁶.

O IMT-2020⁷ compilou as possíveis aplicações e diversas especificações que devem ser seguidas na quinta geração de telefonia móvel. Das aplicações citadas, a com maior possibilidade de crescimento é a comunicação entre máquinas (M2M)⁶, que visa a comunicação na qual o cliente final são dispositivos autômatos, como redes sem fio de sensores e eletrodomésticos inteligentes. Deste modo se torna uma área atrativa para expansão e desenvolvimento de novos dispositivos.

Um ponto crucial do projeto de dispositivos móveis é o desenvolvimento de antenas que atendam as especificações da tecnologia na qual o dispositivo é proposto a operar. Como primeiro requisito é necessário operar nas faixas de frequências especificadas e forte rejeição nas faixas indesejadas. Também devido ao tamanho diminuto dos equipamentos empregados nessa aplicação se torna necessário o uso de antenas de pequenas dimensões e baixo peso. E adicionalmente é desejável um baixo custo e facilidade na fabricação.

Por essa ótica, as antenas de microfita se tornam atraentes, por cumprirem a maior parte das exigências da tecnologia. De modo geral, as antenas de microfita tradicionais trabalhando em uma única faixa de frequência e não apresentam uma largura de faixa aceitável para essa aplicação, porém essas deficiências podem ser superadas aplicando uma geometria fractal no radiador da antena⁸

A geometria fractal tem se mostrado competitiva devido ao seu comportamento de multifreqüência e banda larga acompanhando por uma redução de dimensões (miniaturização) devido a sua autossimilaridade e propriedade de preenchimento de espaço⁸.

O matemático B. Mandelbrot é considerado o pai da geometria fractal, mas além dele diversos outros matemáticos contribuíram para esse campo, como W. Sierpinski, N. F. H. von Koch, D. Hilbert, G. F. L. P. Cantor, H. Minkowski, e G. Peano. Seus fractais têm sido inspiração para a comunidade de engenharia de antenas buscar soluções versáteis para suas aplicações⁹.

Entretanto, devido à complexidade da geometria fractal, técnicas computacionais têm sido utilizadas para miniaturização da antena e otimização dos seus parâmetros de construção, como a própria geometria, a posição de alimentação, a espessura do substrato etc.⁹ Resultados satisfatórios têm sido obtidos através de simulações eletromagnéticas utilizando o Método dos Momentos (MoM) combinados com algoritmos genéticos (GA)¹⁰. Essas técnicas são conhecidas como design auxiliado por computador (CAD)² e vêm sendo utilizadas na otimização de aplicações de eletromagnetismo desde meados da década de 1990¹¹.

Desse modo, um trabalho sobre técnicas de otimização de antenas fractais de microfita usando CAD pode gerar contribuições na área de projeto de antenas para os sistemas propostos na quinta geração de comunicação móvel.

2 OBJETIVOS

Este trabalho objetiva explorar a tecnologia de antenas fractais de microfita realizando estudos, propondo melhorias e novas configurações obtidos através de auxílio computacional que proporcionem uma melhor operação nos sistemas propostos para a quinta geração de comunicação móvel.

Para atingir esse objetivo, foi feito preliminarmente um estudo inicial da teoria de antenas de microfita, com especial ênfase nos impactos do uso de geometria fractal. Simultaneamente, foi realizada uma pesquisa sobre a utilização de algoritmos computacionais para otimização de antenas que possuem essa geometria.

Na continuidade da pesquisa de mestrado, segue-se então com a proposição de novas configurações de antenas fractais que conduzam à otimização dos seus desempenhos nas frequências de interesse da quinta geração de comunicação móvel. O desempenho das configurações de antenas propostas é avaliado por meio de simulações computacionais eletromagnéticas tridimensionais (EM-3D), determinando-se parâmetros da antena como ganho, largura de banda, coeficiente de reflexão (S_{11}), eficiência de radiação etc.

Então, as antenas com configurações otimizadas que apresentarem resultados simulados mais interessantes, procederão à construção de protótipos. Os protótipos construídos serão caracterizados eletricamente, incluindo as medidas de coeficiente de reflexão e de seus diagramas de radiação, para que os resultados obtidos possam ser comparados aos resultados simulados, bem como aos de configurações já existentes. Assim sendo, os objetivos deste trabalho podem ser sintetizados na relação a seguir:

- a) Desenvolver estudos de configurações de antenas de microfita, com ênfase nas antenas de geometria fractal e nos impactos dessa geometria;
- b) Estudo e análise de algoritmos computacionais, especialmente os denominados algoritmos genéticos.

- c) Implementar rotinas de execução dos algoritmos genéticos para otimização de desempenho e miniaturização das antenas fractais de microfita;
- d) Especificar e projetar antenas com as novas configurações propostas;
- e) Construir as antenas projetadas;
- f) Caracterizar as antenas projetadas nas faixas de frequências de operação dos sistemas de quinta geração, fazendo-se medidas de parâmetro de espalhamento S_{11} e de diagrama de radiação;
- g) Comparar os resultados experimentais das antenas projetadas com configurações reportadas na literatura e com resultados de simulações computacionais EM-3D, discutindo-se os méritos e limitações da metodologia de projeto utilizada e das configurações propostas de antenas planares.

3 METODOLOGIA DE TRABALHO

Abaixo seguem listadas as etapas que foram planejadas visando conduzir esse trabalho de modo a alcançar os objetivos deste trabalho.

- Estudo bibliográfico de configurações de antenas fractais de microfita

O estudo bibliográfico compreende revisão da teoria de antenas de microfita, dando-se ênfase nas antenas de geometria fractal e nos impactos dessa geometria. Ao mesmo tempo, essa etapa prevê a realização de uma pesquisa de estruturas de antenas fractais de microfita reportadas na literatura técnica e de seus resultados experimentais.

- Estudo e análise de algoritmos computacionais focados em otimização

O estudo e análise de algoritmos computacionais objetiva a realização de um estudo comparativo de métodos de solução para problemas complexos usando rotinas computacionais, de modo a avaliar quais têm melhor rendimento para a otimização de desempenho e miniaturização de antenas fractais de microfita. A literatura técnica traz diversas referências ao uso de algoritmos genéticos para esse tipo de solução, e nessa etapa essa família de algoritmos será explorada.

- Avaliação e seleção dos programas mais adequados para simulações computacionais EM-3D de antenas fractais de microfita em conjunto com a linguagem de programação para implementação do algoritmo de otimização.

A avaliação de programas de simulação computacional EM-3D consiste no estudo dos recursos oferecidos pelos mesmos, avaliando-se suas funcionalidades e limitações para simulações de antenas fractais de microfita. Também será levado em consideração a facilidade de integração entre a linguagem de programação utilizada para implementação do algoritmo de otimização. Com base nesse estudo, são selecionados os programas mais adequados para a execução de simulações, dentre eles estão *Advanced Design System* (ADS), da *Keysight Technologies*, e *CST Studio Suite*, da *Computer Simulation Technology* (CST). Já as linguagens de programações mais cotadas são Python e MATLAB.

- Implementar as rotinas de execução dos algoritmos de otimização

Com base no programa de simulação e na linguagem de programação escolhida na etapa anterior, prevê-se a implementação das rotinas baseadas no algoritmo de otimização e integrá-la ao programa de simulação EM-3D. A fim de validar as rotinas e a integração serão reproduzidos casos já conhecidos na literatura.

- Estudo e definição de especificações de antenas fractais para aplicação em sistemas de telefonia móvel

Nessa etapa serão definidas as especificações das antenas a serem construídas para operação nas frequências da quinta geração de telefonia móvel. Também definidos os parâmetros da estrutura da antena que serão otimizados pelo algoritmo.

- Projeto das antenas especificadas

Estando definidas as especificações das antenas a serem construídas, prossegue-se com o projeto das mesmas. Essa etapa envolve escolha e cálculo de estruturas e de geometrias a serem empregadas.

- Simulações computacionais EM-3D das antenas projetadas e otimização de seus parâmetros geométricos

Como auxílio ao projeto das antenas especificadas para construção, propõe-se a utilização de simulações computacionais EM-3D para verificação de resultados e dos algoritmos para otimização de geometrias das estruturas projetadas.

- Fabricação das antenas projetadas

A fabricação das antenas projetadas será realizada utilizando-se técnicas de fotogravação ou de microfresagem.

- Medidas do coeficiente de reflexão da antena (S_{11}) das antenas construídas

Após a construção das antenas projetadas, prevê-se a caracterização elétrica das mesmas por meio de medidas de parâmetro S_{11} na faixa de frequências de micro-ondas.

- Medidas de diagramas de radiação das antenas construídas

Após a construção das antenas projetadas, prevê-se também a medida de seus diagramas de radiação na faixa de frequências de micro-ondas.

- Análises comparativas de resultados

Com a disponibilidade de resultados experimentais e de resultados de simulações computacionais EM-3D, são propostas duas análises comparativas com o intuito de se validar o desempenho das novas configurações propostas de antenas planares de micro-ondas e de se discutir vantagens e limitações dessas configurações e da metodologia de projeto empregada.

A primeira análise consiste em uma comparação entre características experimentais das antenas fabricadas e resultados de simulações computacionais EM-3D, com discussão do procedimento de projeto utilizado. A segunda análise constitui-se em uma comparação entre características experimentais das antenas fabricadas e características de antenas fractais de microfita reportadas na literatura, com discussão das configurações propostas.

4 PRINCÍPIOS TEÓRICOS

Esta seção aborda as definições e os fundamentos teóricos sobre os quais esse trabalho se estrutura.

No primeiro momento são apresentados os parâmetros fundamentais de antenas, seguido pela apresentação dos diferentes tipos de antenas de microfita. Posteriormente é trazido um breve resumo sobre a geometria fractal e os principais exemplos encontrados na literatura. Então, também são apresentadas as técnicas de design auxiliado por computador utilizadas nesse trabalho, mais especificamente o algoritmo genético. Por fim, são especificadas as características relevantes da quinta geração da telefonia móvel para esse trabalho.

4.1 PRINCIPIOS FUNDAMENTAIS DE ANTENAS

São definidos diversos parâmetros para caracterizar antenas, entretanto para tipos específicos de antena apenas alguns precisam ser especificados. Portanto, durante essa subseção serão definidos, por ordem de relevância, os parâmetros usados para caracterizar as antenas fractais utilizadas nesse trabalho.

4.1.1 Largura de Banda

Define-se a largura de banda como o intervalo de frequência no qual a antena tem uma resposta considerada satisfatória baseada em algum parâmetro, seja ele impedância, polarização, diagrama de radiação etc.¹ Há diferentes maneiras de apresentar a largura de banda, sendo a mais comumente encontrada a banda fracionária da antena, expressa em porcentagem da razão entre largura de banda e a frequência central da antena, como demonstrada na Equação (1):

$$\%LB = \frac{\Delta f}{f_0} \cdot 100\% = \frac{2\Delta f}{f_s + f_i} \cdot 100\% = \frac{2(f_s - f_i)}{f_s + f_i} \cdot 100\% \quad (1)$$

Onde:

%LB – largura de banda fracionária da antena

$\Delta f = f_s - f_i$, largura de banda da antena

f_0 – frequência central da banda

f_s – frequência superior da banda

f_i – frequência inferior da banda

Sendo assim, as frequências f_s e f_i correspondem aos limites superior e inferior, respectivamente, de uma banda na qual a antena tem uma operação aceitável perante de um dado parâmetro.

Geralmente, são definidos dois tipos de larguras de banda, *Largura de Banda de Diagrama* e *Largura de Banda de Impedância* relacionados a diferentes parâmetros da antena. A *Largura de Banda de Diagrama* tem como parâmetros associados o ganho, nível de lóbulo lateral, largura de feixe e polarização. Já a impedância de entrada e eficiência de radiação estão associadas à *Largura de Banda de Impedância*¹.

O enfoque deste trabalho é otimizar a largura de banda de impedância das antenas fractais de microfita de modo a atender a faixas de frequências utilizadas na quinta geração de telefonia móvel.

4.1.2 Impedância de Entrada

A antena faz uma transição entre uma onda guiada e o espaço livre, como apresentado na figura 1.

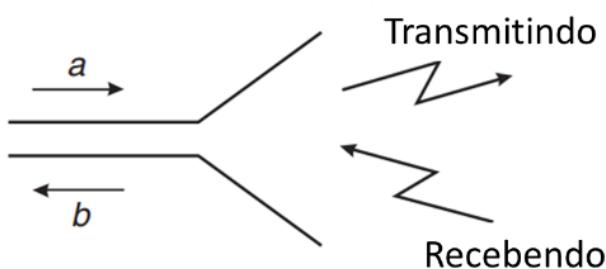


Figura 1 – Transição entre linha de transmissão e antena³.

A antena está transmitindo quando uma onda guiada de amplitude a está viajando em direção à antena, sendo irradiada em maior ou menor quantidade para o meio ao entorno da antena. E caso a antena esteja recebendo, ela transfere a energia captada do meio para a linha de transmissão com amplitude b que viaja na direção oposta da antena³.

Uma antena pode ter seu comportamento representado por modelos de circuito elétrico equivalente série ou paralelo, como mostrado na figura 2, onde a antena é representada por a) sua impedância de entrada Z e sua fonte de tensão V_0 , ou por b) sua admitância Y e sua fonte de corrente I_0 .

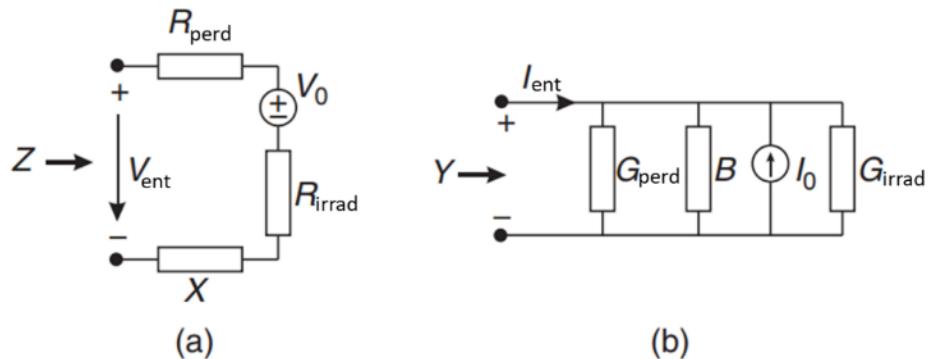


Figura 2 – Representações de uma antena em (a) Impedância (Circuito equivalente de Thevenin) e (b) Admitância (circuito equivalente de Norton)³.

Na Figura 2, R_{perd} e G_{perd} representam o efeito das perdas na estrutura da antena, sejam elas condutivas ou dielétricas. A reatância e a susceptância equivalentes da antena são representadas por X e B , respectivamente. Já a resistência R_{irrad} ou a condutância G_{irrad} estão associadas a potência da onda irradiada para o meio que envolve a antena. As fontes de tensão ou corrente V_0 ou I_0 são relativos ao sinal captado do meio pela antena. Por fim, V_{ent} ou I_{ent} representam a tensão ou corrente da fonte que alimenta a antena, quando a mesma está transmitindo, sendo que V_0 ou I_0 são zero nessa condição.

No modo de recepção, os terminais do circuito estão conectados à uma carga e V_0 ou I_0 são diferentes de zero, representando a excitação por uma onda incidente na antena. A máxima

transferência de potência recebida pela antena para a carga ocorre quando a impedância da carga é o conjugado da impedância de entrada da antena.

O descasamento entre a impedância de entrada da antena e o gerador ou a carga pode levar a maiores ou menores perdas na antena. Do ponto de vista de circuitos, esse casamento entre antena e gerador/carga é muito importante, portanto, são comumente utilizadas definições de largura de banda baseadas no coeficiente de reflexão (Γ ou S_{11}). O coeficiente de reflexão entre o alimentador e a antena é definido como:

$$\Gamma = \frac{Z - Z_0}{Z + Z_0} = S_{11} \quad (2)$$

Onde:

Γ – coeficiente de reflexão entre o alimentador e a antena

Z – impedância de entrada da antena

Z_0 – impedância característica do alimentador

S_{11} – coeficiente de reflexão da porta 1

O valor em decibéis do módulo do parâmetro S_{11} é dado por

$$|S_{11}|(dB) = 20\log(|S_{11}|) \quad (3)$$

A relação entre a taxa de onda estacionária e o módulo do parâmetro S_{11} é dada por

$$TOE = \frac{1+|S_{11}|}{1-|S_{11}|} \quad (4)$$

Onde:

TOE – taxa de onda estacionária

A largura de banda de impedância corresponde à faixa de frequências na qual o casamento de impedância é considerado satisfatório. Geralmente o valor de referência do módulo do parâmetro S_{11} da antena (coeficiente de reflexão entre o alimentador e a antena) de -10 dB, que equivale aproximadamente a taxa de onda estacionária (TOE) de 2:1. Nesse caso, a largura de banda de impedância corresponde à faixa de frequências em que o valor do módulo de S_{11} é menor do que -10 dB, ou em que o valor da taxa de onda estacionária é menor do que 2:1. Salvo

menção contrária, este será o critério adotado neste trabalho quando houver referência à largura de banda de impedância.

4.1.3 Polarização

A polarização é uma propriedade eletromagnética que descreve o formato e a orientação dos vetores de campo em função do tempo. Dentro do campo de estudo de antenas, há interesse nas propriedades de polarização de onda que podem ser consideradas planas na região de observação.

Uma onda é considerada plana numa região distante o suficiente da antena na qual as componentes de campo são essencialmente transversais, ou seja, o campo elétrico e o campo magnético são perpendiculares entre si e perpendiculares à direção de propagação. Essa região é denominada de *região de campo distante* e é comumente aceito a distância entre a antena e sua região de campo distante é dada por:

$$R_{cd} = \frac{2D^2}{\lambda} \text{ para } D > \lambda \quad (5)$$

Onde:

R_{cd} – Distância de campo distante.

D – a maior dimensão da antena.

λ – o comprimento de onda.

Para uma onda plana é suficiente definir as propriedades do campo elétrico, uma vez que o campo magnético é relativo ao campo elétrico. Define-se o *plano de polarização* como o plano que contém os vetores do campo elétrico e do campo magnético, sendo ortogonal à direção de propagação³. A polarização da onda é definida pela trajetória descrita pelo vetor campo elétrico ao longo do tempo no plano de polarização.

A polarização pode ser classificada em três tipos, *Linear*, *Circular* ou *Elíptica*. O campo é definido como polarizado linearmente quando o vetor campo elétrico descreve uma trajetória ao longo de uma linha. No entanto, quando o campo elétrico descreve uma trajetória elíptica, o campo é dito elipticamente polarizado¹. No caso de polarização circular ou elíptica, o sentido da rotação do campo elétrico define se a polarização é no sentido horário ou no sentido anti-horário, também definidos como polarização à direita ou à esquerda, respectivamente. Outro parâmetro importante numa polarização elíptica é a razão axial, definida pela razão entre as dimensões do eixo maior e do eixo menor da elipse traçada pelo campo elétrico numa dada posição¹. Sendo:

$$RA = \frac{\text{eixo maior}}{\text{eixo menor}}, 1 \leq RA \leq \infty \quad (6)$$

De modo a se obter melhor resposta da antena recebendo uma onda de uma determinada direção é necessário que a polarização da onda tenha a mesma razão axial, o mesmo sentido de polarização e a mesma orientação espacial que a polarização da antena nessa direção³.

Uma perda devido à incompatibilidade de polarização ocorre quando a polarização da onda incidente é diferente da polarização de recepção da antena. Sendo:

$$\eta_p = \text{eficiência de polarização (sem unidade)} \quad (7)$$

Onde η_p é a razão entre a potência recebida pela antena e a potência recebida quando a polarização da onda incidente é combinada com a polarização da antena receptora³.

A polarização depende do controle da excitação de modos ressonantes ortogonais nas antenas. A isolação entre esses modos determina seu nível de polarização cruzada (ortogonal à polarização de interesse) em relação à polarização de interesse.

4.1.4 Diagrama de radiação

O diagrama de radiação de uma antena ou o diagrama de antena é definido como “uma função matemática ou representação gráfica das propriedades de radiação de uma antena em função de coordenadas espaciais. Na maioria dos casos, o diagrama de radiação é determinado em campo distante e é representado como uma função das coordenadas direcionais. As propriedades de radiação incluem fluxo de densidade de potência, intensidade de radiação, força de campo, diretività, fase ou polarização.”¹. Normalmente, as propriedades de radiação mais relevantes são aquelas relacionadas a distribuição espacial de energia irradiada, como os lóbulos do diagrama e larguras de feixe. A Figura 3 apresenta um diagrama de radiação e suas principais propriedades.

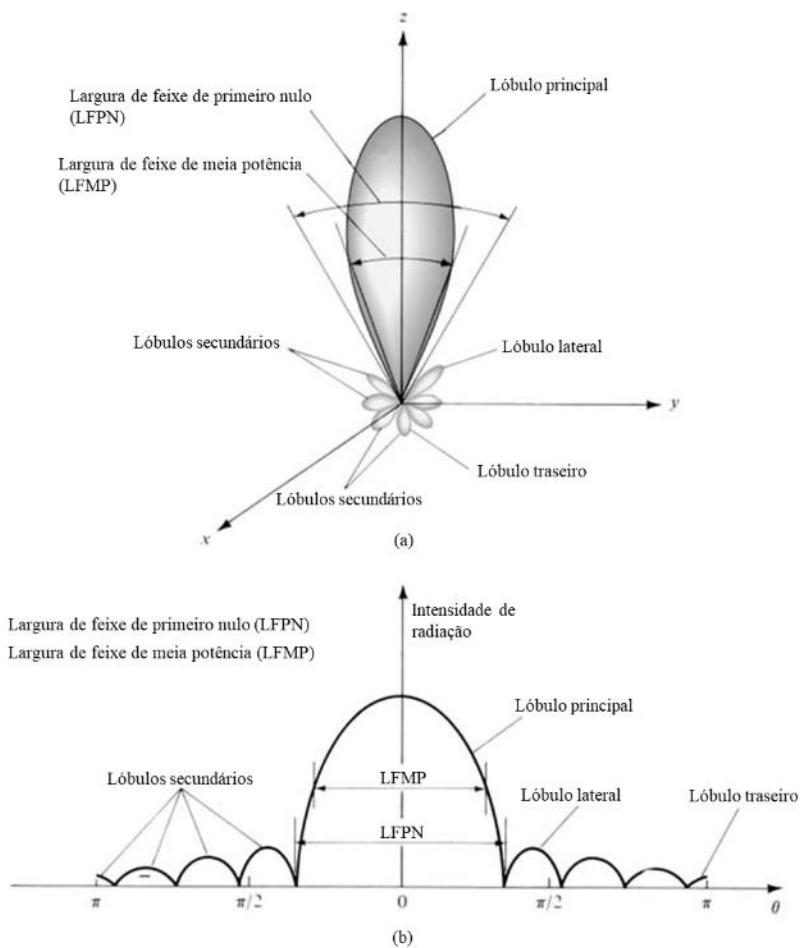


Figura 3 – (a) Lóbulos de radiação e larguras de feixe de um diagrama de antena. (b) Projeção linear do diagrama de potência e seus lóbulos associados e larguras de feixe¹.

Um lóbulo de radiação é definido como uma porção do diagrama de radiação limitado por regiões de intensidade de radiação relativamente baixa. Os principais tipos de lóbulos são:

- Lóbulo principal – também chamado de feixe principal, que contém a direção de máxima radiação;
- Lóbulos secundários – qualquer lóbulo que não seja o lóbulo principal;
- Lóbulo lateral – o lóbulo adjacente ao lóbulo principal;
- Lóbulo traseiro – o lóbulo cujo eixo se encontra a 180° do lóbulo principal.

Geralmente, lóbulos secundários representam direções indesejadas de radiação e eles devem ser minimizados com objeto de concentrar a energia de radiação no lóbulo principal.

A largura de feixe é definida como a separação angular entre dois pontos idênticos em lados opostos do lóbulo principal. As larguras de feixe mais amplamente usada é a de meia-potência, na qual os pontos de referência são onde a potência irradiada é a metade da potência na direção de máxima radiação do lóbulo principal. Outra largura de feixe importante é a de primeiro nulo, que define a distância angular entre os pontos nos quais a radiação é mínima na região limite do lóbulo principal.

4.1.5 Ganho

O ganho é outra medida que descreve a performance de uma antena, ele é diretamente relacionado à diretividade, entretanto enquanto a diretividade descreve apenas as propriedades direcionais da antena, o ganho contabiliza a eficiência de radiação da antena¹.

O ganho da antena numa dada direção é definido pela Equação (9).

$$G(\theta, \phi) = e_{cd} \left[4\pi \frac{U(\theta, \phi)}{P_{rad}} \right] = e_{cd} D(\theta, \phi) \text{ (adimensional)} \quad (8)$$

Onde:

e_{cd} – é a eficiência de radiação da antena, considerando a eficiência condutiva (e_c) e a eficiência dielétrica (e_d);

$U(\theta, \phi)$ – é a intensidade de radiação na dada direção;

P_{rad} – é a potência irradiada;

$D(\theta, \phi)$ – a diretividade da antena numa dada direção.

O valor máximo de ganho é relacionado à máxima diretividade, resultando na Equação (10).

$$G_0 = G(\theta, \phi)|_{max} = e_{cd} D(\theta, \phi)|_{max} = e_{cd} D_0 \quad (9)$$

Segundo os padrões do IEEE “O ganho não inclui perdas decorrentes de descasamento de impedância (perdas de reflexão) e descasamento de polarização”. Portanto, na literatura¹ é definido também o ganho absoluto que inclui as perdas por descasamento, fornecido pela Equação (11) em função do coeficiente de reflexão, que por sua vez é definido na Equação (2).

$$G_{abs}(\theta, \phi) = e_r G(\theta, \phi) = (1 - |\Gamma|^2) G(\theta, \phi) = e_r e_{cd} D(\theta, \phi) = e_0 D(\theta, \phi) \quad (10)$$

Usualmente o ganho é dado em termos de decibéis ao invés de uma quantidade adimensional. Essa conversão é dada por:

$$G_0(dB) = 10 \log_{10}(e_{cd} D_0) \quad (11)$$

4.2 ANTENAS DE MICROFITA

Nesta secção são abordas as antenas de microfita que constituem um grupo particular das antenas planares.

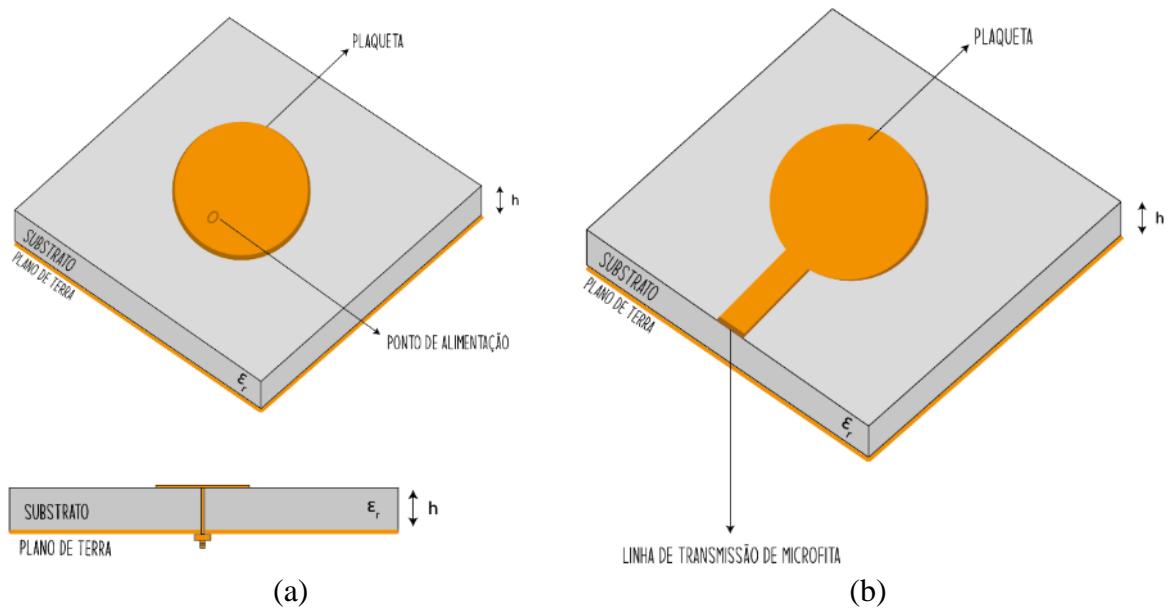
Antenas planares de micro-ondas são estruturas que empregam elementos radiantes em forma de folha, ou seja, de espessura muito pequena (muito menor do que o comprimento de onda no espaço livre λ_0 de operação da antena), e que operam na faixa de frequências de micro-ondas. Observa-se que o elemento radiante pode estar dobrado, não estando necessariamente contido em um único plano, como será visto mais adiante.

Por sua natureza construtiva, apresentam características adequadas para o emprego em sistemas de comunicação móvel. São geralmente antenas que possuem pequenas dimensões, baixo

peso, baixo custo, facilidade de fabricação e versatilidade. Dependendo da geometria empregada e do tipo de alimentação, é possível se obter antenas com as mais variadas características, como diagrama de radiação, tipo de polarização e frequências de operação. Adicionalmente, esse tipo de antena apresenta a possibilidade de integração de antena, de rede de casamento de impedância e de outros circuitos em um mesmo substrato.

As antenas planares de micro-ondas podem ser classificadas em quatro categorias principais⁴: antenas de microfita, antenas de placa suspensa, antenas planares em L-invertido ou em F-invertido, e antenas monopolos planares. Nesse trabalho apresentaremos as características das antenas de microfita, sendo essas a de maior interesse para o desenvolvimento da geometria fractal.

As formas mais populares de alimentação de uma antena planar são a sonda coaxial, a linha de transmissão de microfita, o acoplamento por proximidade e o acoplamento por abertura¹, apresentadas na Figura 4.



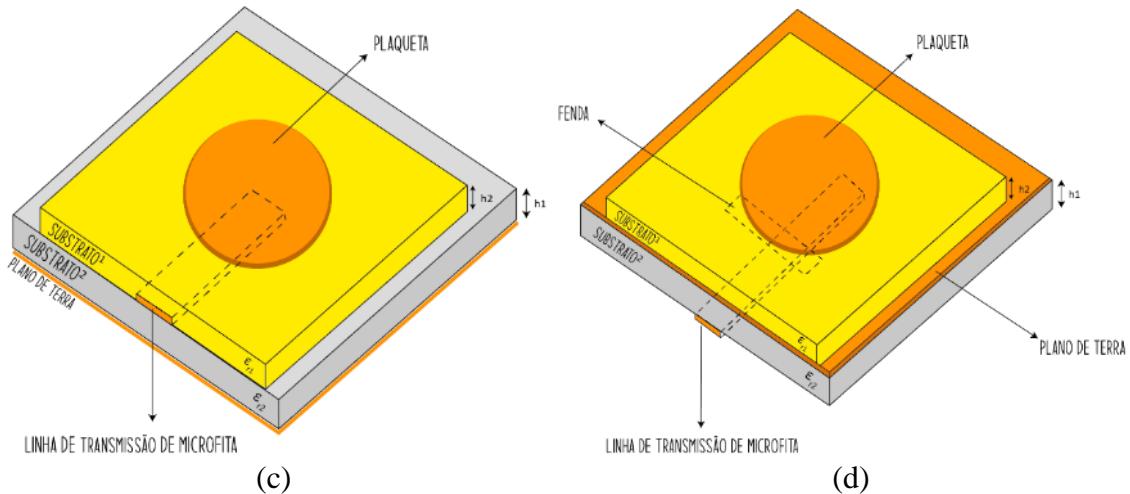


Figura 4 – Configurações de antenas de microfita alimentadas (a) Por sonda coaxial; (b) Por linha de transmissão de microfita; (c) Por acoplamento por proximidade; (d) Por acoplamento por abertura.

Na alimentação por sonda coaxial, o condutor interno do conector coaxial é conectado ao elemento condutor radiante, enquanto o condutor externo é conectado ao plano de terra da antena.

Na alimentação por linha de transmissão de microfita, a fita condutora é diretamente conectada ao elemento condutor radiante, enquanto os planos de terra da linha e da antena são diretamente conectados.

Na alimentação por acoplamento por proximidade, a linha de transmissão de microfita é separada do elemento radiante por uma camada de material dielétrico, de forma que os campos eletromagnéticos na linha se acoplem ao radiador por proximidade.

Na alimentação por acoplamento por abertura, uma fenda no plano de terra, localizado entre a linha de transmissão de microfita e o elemento radiante, permite o acoplamento dos campos eletromagnéticos entre a linha e o radiador.

O tipo de alimentação e sua posição determinam, em conjunto com o substrato e com a geometria do radiador, os modos ressonantes excitados na antena, que afetam diretamente sua impedância de entrada e suas características de radiação, como polarização, ganho e diagrama

de radiação. Adicionalmente, o tipo de alimentação também pode influenciar na largura de banda de impedância da antena, como será visto ao longo deste texto.

Em 1953, Deschamps¹³ foi o pioneiro na proposição do conceito de radiadores de microfita. Contudo, as primeiras antenas práticas foram desenvolvidas por Howell¹⁴ e Munson¹⁵ apenas na década de 70. A partir de então, extensas pesquisas foram realizadas sobre as antenas de microfita, buscando-se técnicas e métodos para sua análise e síntese, de forma a explorar suas vantagens e expandir seu campo de aplicação.

A antena de microfita, em sua configuração mais simples, que é a antena de placa de microfita, consiste em uma fita (também denominada placa) condutora radiadora de espessura muito pequena (muito menor do que o comprimento de onda no espaço livre λ_0 de operação da antena) impressa sobre um substrato de material dielétrico de espessura h típica de uma fração de λ_0 . A outra face do substrato é revestida inteiramente por uma camada condutora, também de espessura muito pequena, que constitui o plano de terra. Essa configuração mais simples da antena de microfita é apresentada na Figura 5.

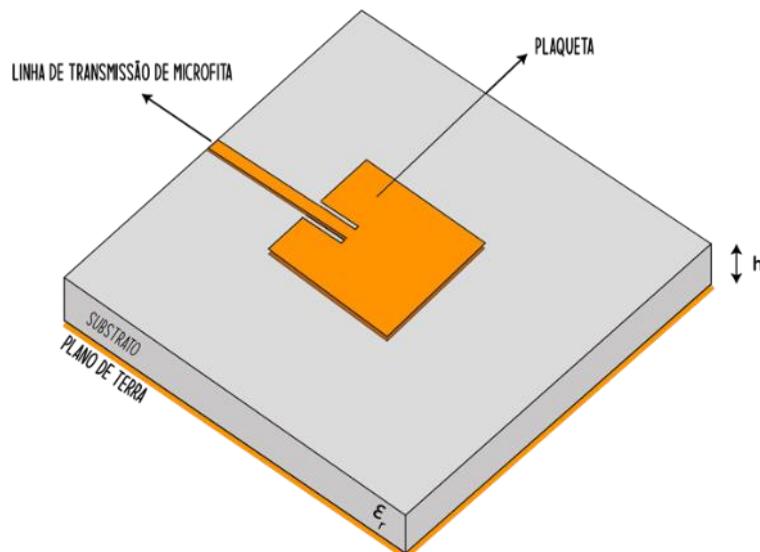


Figura 5 – Configuração de uma antena de placa de microfita.

São empregados normalmente substratos espessos e com baixo valor de constante dielétrica ϵ_r (com valores geralmente entre 2,2 e 12), de forma a se obter um maior franjamento de campos eletromagnéticos nas bordas da placa, o que contribui para o mecanismo de radiação¹.

Há virtualmente um número ilimitado de formatos geométricos que a placa pode assumir, possibilitando a obtenção de antenas com diferentes características de radiação. A Figura 6 apresenta alguns exemplos de geometrias de placas utilizadas na prática.

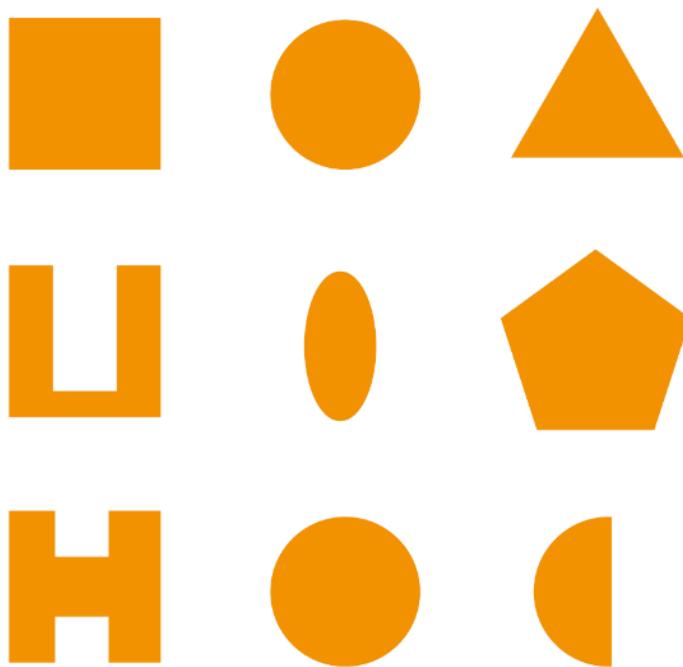


Figura 6 – Exemplos de formatos geométricos de placas em antenas de microfita⁴.

As antenas de microfita apresentam diversas vantagens^{1, 16-18}, muitas delas compartilhadas também com outras antenas planares de micro-ondas e já mencionadas anteriormente. Particularmente, as antenas de microfita são as antenas planares de micro-ondas com maior facilidade de fabricação e maior robustez mecânica, quando construídas utilizando substratos rígidos.

No entanto, as configurações mais básicas de antenas de microfita, comparativamente a antenas convencionais de micro-ondas, como antenas cornetas e antenas de refletor parabólico, apresentam algumas desvantagens^{1, 16-18}, como menor ganho, menor capacidade de potência e menor largura de banda de impedância.

Devido a essa pequena largura de banda apresentada por essas configurações mais básicas, além de sofrer limitações em seu campo de aplicação, elas acabam por estar mais fortemente sujeitas a deslocamentos significativos de frequência de ressonância, que podem ocorrer devido à precisão insuficiente em seu processo de fabricação. Outro fator que também pode provocar os mencionados deslocamentos de frequência de ressonância é a exposição ao meio ambiente, que pode ocasionar algum tipo de alteração em suas propriedades dielétricas, devido da umidade e temperatura ambientes⁴.

Existem diversos tipos de antenas de microfita. Elas podem ser classificadas em quatro grandes categorias¹: antenas de placa de microfita, antenas dipolos impressos, antenas impressas de fenda, e antenas de ondas viajantes de microfita.

As antenas de placa de microfita (antenas *patch* de microfita) são a configuração mais básica e simples de antenas de microfita, como já mencionado anteriormente. Constituem-se de uma placa condutora radiadora de espessura muito pequena, impressa sobre um substrato dielétrico de espessura h tipicamente de uma fração de λ_0 , com a outra face revestida por um plano de terra condutor, também de espessura muito pequena, como já mostrado na Figura 5.

A antena de placa de microfita pode ser modelada de diversas formas^{1, 17}. Uma delas é o modelo de cavidade ressonante. Ela pode ser tratada mais precisamente como um ressonador de microfita.

Da mesma forma como ocorre em um ressonador de microfita, a antena de placa de microfita apresenta frequências de ressonância bem definidas de acordo com o modo ressonante que nela é excitado. A excitação de modos ressonantes depende da geometria da placa, do tipo e posição de sua estrutura de alimentação, e das características do substrato.

Em um ressonador de microfita, existem quatro mecanismos de perdas: perdas condutivas, perdas dielétricas, perdas por ondas de superfície e perdas por radiação (por ondas espaciais).

A antena de placa de microfita explora justamente o último mecanismo. Nesse caso, as perdas por radiação são geralmente muito maiores do que as outras⁴.

O mecanismo de radiação da antena se dá por meio das regiões de fronteira da placa (bordas). As ondas eletromagnéticas excitadas no interior do substrato entre a placa e o plano de terra são irradiadas por essas regiões de fronteira. Assim, essas regiões comportam-se como fendas radiantes.

As antenas de placa de microfita de geometrias tradicionais (retangular, circular, triangular e pentagonal) apresentam características semelhantes. Tipicamente, em operação em seu modo ressonante fundamental, são antenas direcionais com máxima radiação na direção perpendicular ao plano da placa e do substrato, no sentido do plano de terra para a placa.

As antenas dipolos impressos constituem-se de estruturas condutoras de comprimento muito maior do que a largura, que é tipicamente menor do que $0,05 \lambda_0$ ⁴, e de espessura muito pequena, impressas sobre um substrato dielétrico. Um exemplo de configuração de antena dipolo impresso pode ser visto na Figura 7.

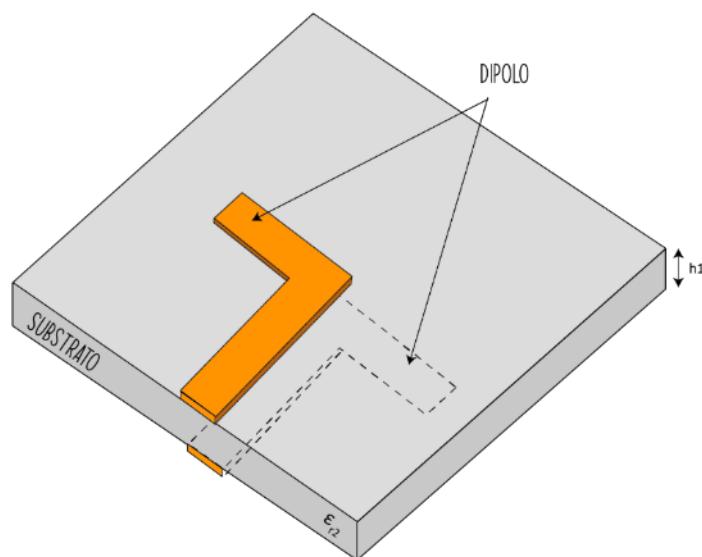


Figura 7 – Configuração de uma antena dipolo impresso.

As antenas dipolos impressos geralmente são pequenas e utilizam substratos mais espessos. Comparativamente às antenas de placa de microfita, apresentam dimensões menores e larguras de banda de impedância maiores, podendo operar em frequências mais altas do que as antenas de placa de microfita de dimensões similares⁴. Trata-se geralmente de antenas de polarização linear.

As antenas impressas de fenda são constituídas de uma linha de transmissão de microfita, que serve de alimentação para a antena, impressa sobre um substrato dielétrico cujo plano de terra possui uma fenda, por onde se dá a radiação. A alimentação desse tipo de antena pode ser feita também por um guia de onda coplanar. A Figura 8 apresenta configurações de antenas impressas de fenda.

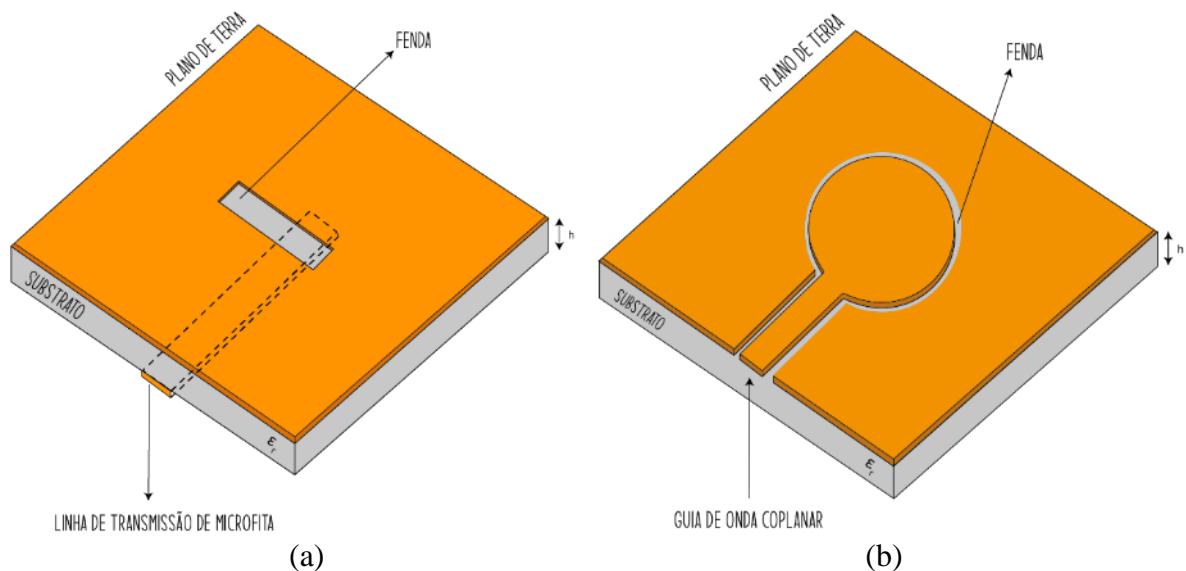


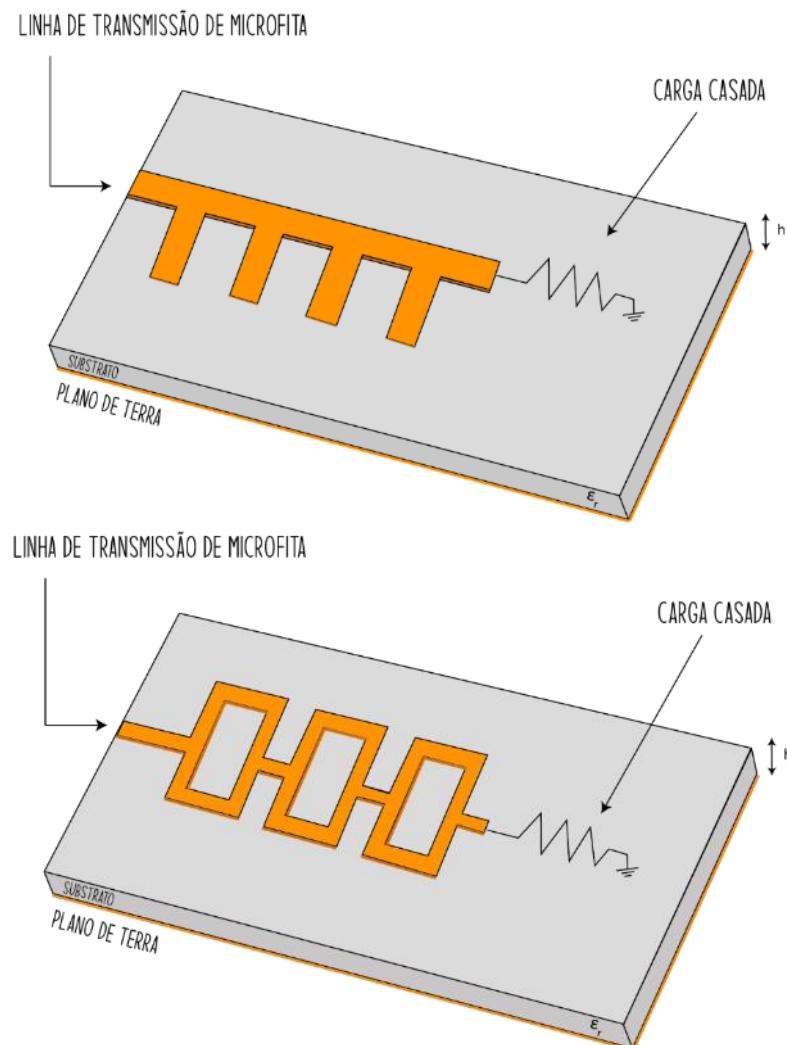
Figura 8 – Configurações de antenas impressas de fenda (a) Com alimentação por linha de transmissão de microfita; (b) Com alimentação por guia de onda coplanar.

A princípio, a fenda pode ter qualquer geometria, sendo que somente as geometrias mais simples (retangular, circular e anular) são comumente estudadas⁴.

Esse tipo de antena apresenta geralmente radiação bidirecional, diferentemente das antenas de placa de microfita, que apresentam radiação unidirecional. Adicionalmente, em comparação às antenas de placa de microfita, as antenas impressas de fenda apresentam, em razão

dessa radiação bidirecional, uma maior largura de banda de impedância, o que contribui para uma menor sensibilidade em relação à tolerância de medidas dos processos de fabricação. É possível ainda se obter antenas com radiação em direções paralelas, o que não ocorre com as antenas de placa de microfita.

Finalmente, as antenas de ondas viajantes de microfita consistem em uma linha de transmissão de microfita longa ou com uma geometria periódica ao longo de seu comprimento, impressa sobre um substrato dielétrico. Uma das terminações da linha recebe a alimentação, enquanto a outra é terminada por uma carga resistiva casada, que tem como objetivo a supressão de ondas estacionárias na antena. A Figura 9 apresenta algumas configurações de antenas de ondas viajantes de microfita.



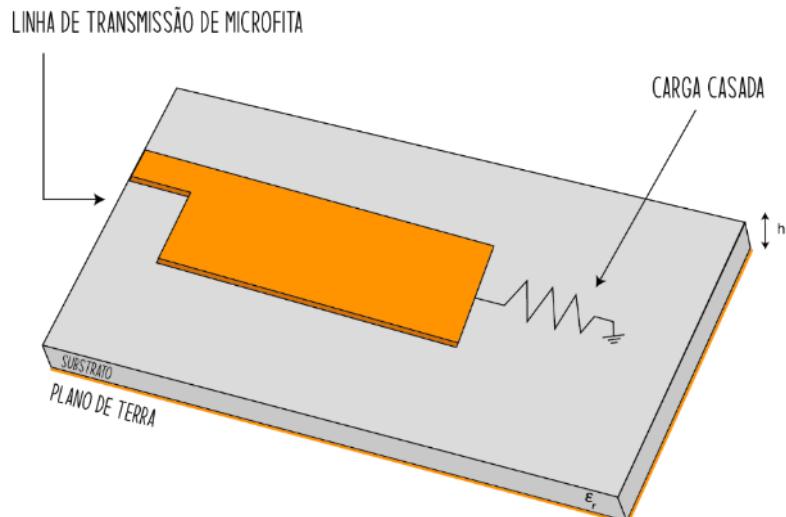


Figura 9 – Configurações de antenas de ondas viajantes de microfita.

Embora as antenas desse tipo apresentem comprimento geralmente maior do que as antenas de placa de microfita, para uma mesma frequência de operação, elas apresentam largura de banda de impedância maior. Isso se deve à terminação casada que absorve e dissipar a potência não irradiada, reduzindo a presença de ondas refletidas na terminação, que se propagam de volta em direção ao alimentador.

Uma antena de ondas viajantes de microfita pode ser projetada para polarização linear ou circular, dependendo de sua alimentação e da geometria do radiador. Na literatura¹⁹, é apresentada uma antena de ondas viajantes de microfita de polarização circular com largura de banda de impedância fracionária de 40% para valores de taxa de onda estacionária menores do que 1,3:1 com razão axial de valor menor do que 3 dB.

4.3 GEOMETRIA FRACTAL

Fractais são objetos geometricamente complexos que possuem uma estrutura não trivial em escalas arbitrárias²⁰. Essa seção inicia-se com a descrição de alguns exemplos de fractais com estrutura recorrente simples. A partir deles, é explicado o conceito de “dimensão fractal” e “dimensão de Hausdorff”. Por fim, serão apresentadas algumas referências de fractais aplicados ao campo de antenas.

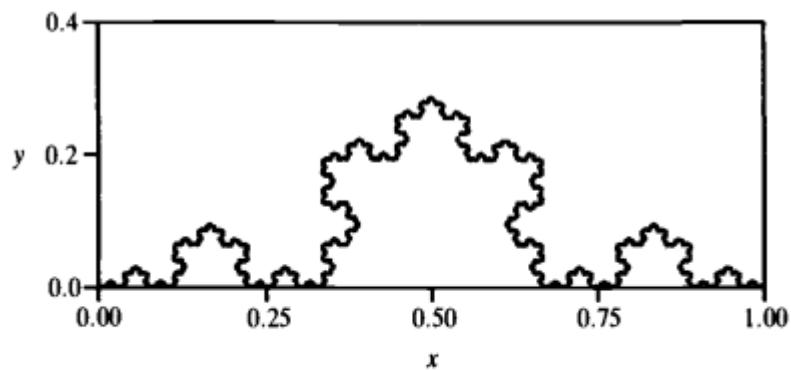
4.3.1 Fractais de estrutura recorrente simples

Abaixo são listados alguns dos fractais mais conhecidos na literatura.

Curva de Koch^{20, 21} – Esse fractal é construído a partir de um triangulo equilátero que tem seus lados divididos em três partes iguais. Na parte intermediária é colocado um triangulo equilátero menor de lado medindo um terço do lado do triangulo maior. Então, esse processo é repetido para cada lado dos novos triângulos gerados. A figura formada é chamada de Ilha de Koch, já sua borda é conhecida como Curva de Koch. Essa curva não possui comprimento infinito nem tangencia nenhum ponto, mas em contraste com as linhas e curvas de geometria euclidiana, essa curva cria uma geometria fractal. A Figura 10 demonstra o método de construção e um exemplo da Curva de Koch.



(a)



(b)

Figura 10 – A curva de Koch: (a) método de construção e (b) o resultado de um de três lados do triangulo original depois de diversas iterações²⁰.

Conjunto de Cantor^{20, 21} – Este é outro exemplo simples de fractal. O Conjunto de Cantor tem a construção baseada em dividir um segmento em três partes iguais e retirar o terço médio, em sua primeira etapa. Na segunda etapa, retira-se o terço médio de cada um dos dois segmentos restantes da primeira etapa e assim, essas etapas são repetidas com as porções restantes. Se o número de repetições tender ao infinito, o número de segmento também tende ao infinito e seus tamanhos tendem a zero. A Figura 11 apresenta a construção do Conjunto de Cantor.

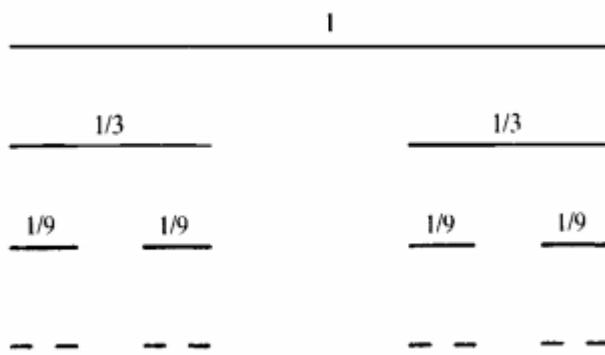


Figura 11 – A construção do Conjunto de Cantor.²⁰

Carpete Sierpinski^{20, 21} – Esse fractal parte da divisão de um quadrado de duas dimensões em nove quadrados menores de lado de um terço do lado do quadrado original, como indicado pelas linhas pontilhadas na Figura 12(a). Então, é eliminado o quadrado menor central. O mesmo processo é aplicado aos quadrados remanescentes no próximo passo. A repetição desse processo iterativo produz o chamado Carpete de Sierpinski. A área total remanescente tende a zero com o número de iterações tendendo ao infinito, semelhantemente ao que ocorre ao comprimento dos segmentos no Conjunto de Cantor. A Figura 12 mostra a contração do Carpete de Sierpinski.

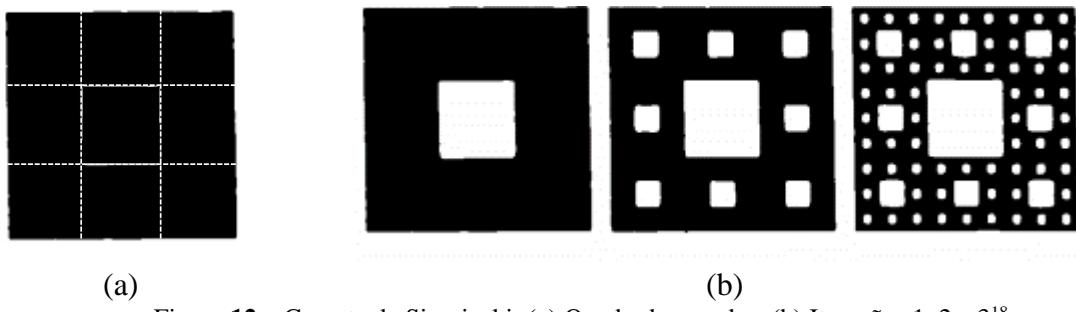


Figura 12 – Carpete de Sierpinski: (a) Quadrado gerador; (b) Iterações 1, 2 e 3^{18} .

Gaxeta de Sierpinski^{20, 21} – Similarmente ao Carpete de Sierpinski, é possível dividir um triângulo equilátero em 4 sub-triângulos e eliminar o central. Repetindo esse processo iterativo é obtido a Gaxeta de Sierpinski. A Figura 13 mostra a construção da Gaxeta de Sierpinski.

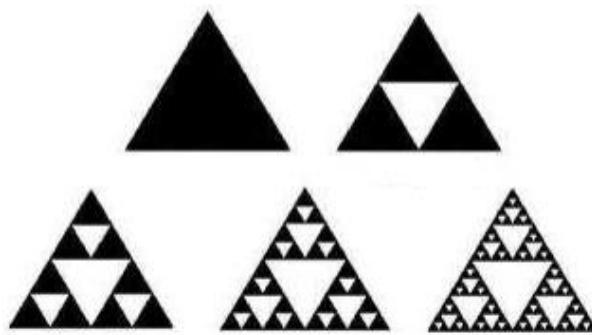


Figura 13 – A construção da Gaxeta de Sierpinski.¹⁹

Esponja de Sierpinski^{20, 21} – Uma extensão tridimensional do Carpete de Sierpinski nos leva a esse fractal, também conhecido como Esponja de Menger. Ele é obtido pelo processo de iteração no qual um cubo é dividido em $3^3 = 27$ cubos menores com lado de um terço do lado do cubo maior. Então, sete cubos centrais são omitidos, restando $27 - 7 = 20$ cubos menores, como mostrado na Figura 14. Repetindo esse processo, o volume da esponja tende a zero.

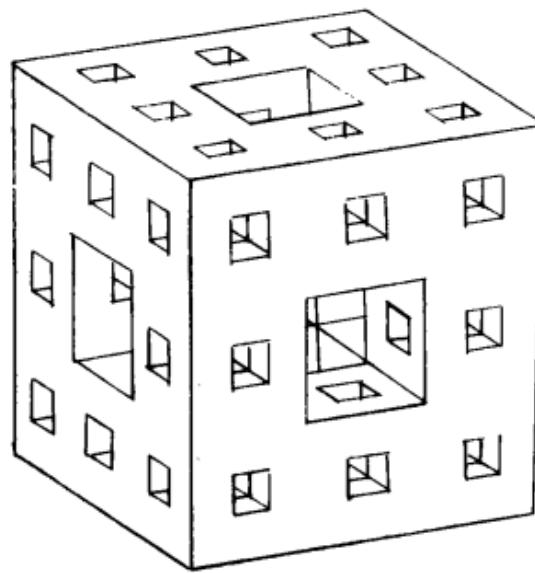


Figura 14 – Segundo estágio de construção da Esponja de Sierpinski.²⁰

Conjunto de Mandelbrot, Julia e Lyapunov^{20, 21} – Esses fractais são mais complexos que os demais, não no seu método de construção, mas sim na sua própria estrutura. Sua construção se baseia em funções complexas iterativas. Devido à dificuldade de reprodução de suas estruturas complexas, não é comum a utilização desses fractais em estruturas irradiantes.

4.3.2 Dimensão fractal e dimensão de Hausdorff

É intuitivamente claro que um objeto geométrico possui um número inteiro de dimensões, por exemplo, um fio possui 1 dimensão, uma folha de papel possui 2 dimensões e um tijolo possui 3 dimensões. Tal dimensão, representa o número de coordenadas necessárias para descrever uma forma. Assim, somente o comprimento define uma linha, para definir um plano usamos comprimento e largura, já um volume é descrito por comprimento, largura e altura²¹.

Outro conceito interessante é a dimensão topológica, que traz a ideia de que um conjunto de dimensão d pode ser dividido por um conjunto de dimensão d-1, por exemplo, uma linha pode ser separada em dois segmentos por um ponto, ou um plano pode ser dividido em dois planos menores por uma curva etc.²²

O foco dessa seção é um diferente aspecto da dimensão, baseado na autossimilaridade dos conjuntos fractais. Essa ideia fundamental nos leva a dimensão fractal para investigar esses conjuntos em diferentes escalas de tamanho.

Considerando um cubo regular de três dimensões com lado de tamanho unitário, que pode ser dividido em cubos menores de lado $s = 1/k$, sendo k qualquer número inteiro positivo, é obtido um número de cubos igual a $N(s) = k^3 = s^{-3}$. Entretanto, se subdividimos um quadrado unitário de duas dimensões em quadrados menores de $1/k$ de lado, teremos $N(s) = s^{-2}$ quadrados menores.

Seguindo esse raciocínio podemos concluir que o expoente das relações acima são a dimensão, ou seja: “*Se um conjunto X em \mathbb{R}^n pode ser subdividido por um número finito $N(s)$ de subconjuntos, todos congruentes (por translações ou rotações) entre si e cada um é uma cópia de X redimensionada por um fator linear s, então a “dimensão de autossimilaridade” de X é o valor único d que satisfaz $N(s) = s^{-d}$* ”,²² descrito na Equação (12):

$$d = \frac{\ln N(s)}{\ln \left(\frac{1}{s}\right)} \quad (12)$$

Essa ideia simples pode ser aplicada a um número interessante de conjuntos. Considere, por exemplo, a Curva de Koch da Figura 10a, analisando qualquer um dos lados da figura do centro podemos dividir em $N = 4$ partes e cada uma dessas partes é uma versão do lado do triângulo redimensionada por um fator $s = 1/3$. A dimensão associada deve satisfazer $3^d = 4$ (ou seja, $d = \ln 4 / \ln 3 \approx 1,26$). A Curva de Koch é uma curva (portanto tem dimensão topológica 1), mas sua dimensão de autossimilaridade é maior do que a de uma linha reta. Ao subdividir uma linha reta em pedaços de um terço do tamanho original, obtemos três partes, mas para a Curva de Koch obtemos quatro partes. Consequentemente, esse é um objeto que está entre uma linha reta e um plano, mas ainda mais próximo de uma linha reta.

Aplicando a Equação (12) ao Conjunto de Cantor, Carpete de Sierpinski, a Gaxeta de Sierpinski e a Esponja de Sierpinski obtemos respectivas dimensões de autossimilaridade:

Tabela 1 – Dimensões de autossimilaridade dos fractais.

Conjunto de Cantor:	$d = \frac{\ln 2}{\ln 3} = 0,6309 \dots$
Carpete de Sierpinski:	$d = \frac{\ln 8}{\ln 3} = 1,8928 \dots$
Gaxeta de Sierpinski:	$d = \frac{\ln 3}{\ln 2} = 1,5850 \dots$
Esponja de Sierpinski:	$d = \frac{\ln 20}{\ln 3} = 2,7268 \dots$

No entanto, para definir as dimensões de conjuntos mais complexos, como o fractal de Mandelbrot ou Julia, é preciso de uma abordagem mais geral que a dimensão de autossimilaridade, como detalhado por Schleicher em²².

4.3.3 Antenas Fractais

Com intuito de diminuir o tamanho e manter a alta eficiência de radiação, uma abordagem fractal para determinar a configuração geométrica da antena é bastante difundida. Duas propriedades fundamentais dos fractais, a autossimilaridade e o preenchimento espacial, proporcionam as antenas redução de dimensões (miniaturização) e múltiplas bandas de operação.

A antena log-periódica, bem conhecida na literatura, introduzida por Duhamel e Isbell por volta da década de 1950 talvez possa ser considerada a primeira antena fractal da história¹. Entretanto, sua verdadeira origem pode ser datada do final da década de 1980, quando Nathan L. Cohen, então professor na Universidade de Boston, começou seu trabalho com elemento fractais. Seus esforços com uma variedade de antenas fractais foi publicado pela primeira vez em 1995, inaugurando as publicações científicas sobre o assunto²³.

A partir de então a geometria fractal vem sendo amplamente empregada no desenvolvimento de antenas. Em⁹, Anguera et al. trazem uma perspectiva histórica baseada em diversas referências de antenas baseadas em diferentes tipos de fractais. Nela é possível perceber a vasta variedade de trabalhos desenvolvidos ao longo dos anos.

4.4 TECNICAS DE OTIMIZAÇÃO E ALGORITMOS GENETICOS

Essa sessão visa apresentar a base das técnicas de CAD, abordando os algoritmos genéticos e seu emprego para otimização de desempenho de antenas. Processos de otimização geralmente iniciam com um conjunto de especificações a serem atendidas e um *design* inicial. Então, uma análise numérica avalia a performance do *design* inicial e resultados obtidos são comparados com a especificação desejada. Caso as especificações não sejam atendidas, são feitas alterações, de maneira ordenada, em alguns parâmetros do *design* inicial. A sequência de análise, comparação com a especificação desejada e alteração dos parâmetros continua iterativamente até que um desempenho satisfatório seja alcançado.

Muito utilizados para esse objetivo, os algoritmos genéticos são métodos numéricos de otimização baseados em emular aspectos da Teoria da Evolução de Darwin. Os GA codificam cada parâmetro em uma sequência binária, chamada gene, que são os blocos básicos desses algoritmos. Já o conjunto de genes é um cromossomo e representa diversos parâmetros. Esses cromossomos passam por um critério de seleção natural, cruzamento e mutação para alcançar a solução ótima^{5, 11}. A Figura 15 apresenta o fluxograma e em seguida são descritas as etapas utilizadas por esses algoritmos.

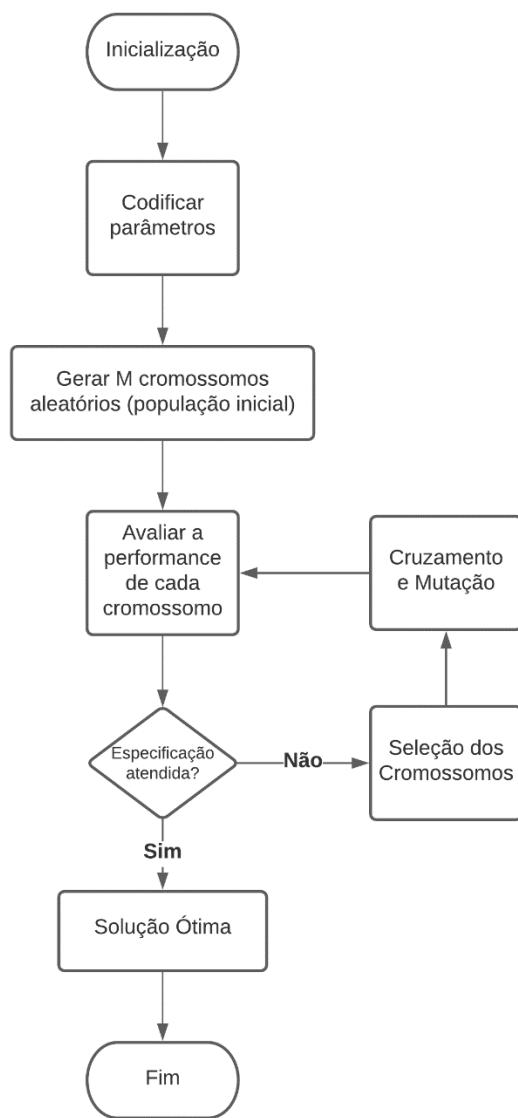


Figura 15 – Fluxograma do algoritmo genético.

Codificar os parâmetros^{5, 11} – A codificação binária de um parâmetro é definida como gene. Ele pode codificar um parâmetro contínuo ou discreto, se contínuo é necessário definir limites ou restringi-lo a alguns possíveis valores. Os genes podem representar desde uma dimensão da antena ou posição de um elemento até o número de iterações de um fractal. Nessa etapa são definidos quais parâmetros estarão sujeitos à otimização. Um conjunto genes é definido como cromossomo e possui N_{par} parâmetros (também chamado de uma otimização N -

dimensional), dados por p_1, p_2, \dots, p_n . A seguir é dado um exemplo de um cromossomo que possui N_{par} parâmetros sendo cada um codificado com $N_{\text{pbits}} = 10$ bits:

$$\text{cromossomo} = \left[\underbrace{1110010011}_{p_1}, \underbrace{1100101010}_{p_2}, \dots, \underbrace{0011001110}_{p_n} \right] \quad (13)$$

Os cromossomos possuem no total de $N_{\text{bits}} = N_{\text{pbits}} * N_{\text{par}}$. Os cromossomos de uma otimização complexa possuem muitos parâmetros, portanto, é necessário buscar a forma mais eficiente de codificar os genes, reduzindo, assim, o número total de bits desses cromossomos e consequentemente reduzindo o número de cruzamentos e mutações¹².

Gerar M cromossomos aleatórios (população inicial)^{5, 11} – Nessa etapa é gerada uma lista de M cromossomos aleatórios, chamada população inicial.

Avaliar a performance de cada cromossomo^{5, 11} – Cada cromossomo tem sua performance avaliada e lhe é atribuído um valor, calculado por uma função de f , que representa o quanto o cromossomo se adequa a especificação. A definição dessa função é de suma importância e os atributos nela considerados devem ser muito bem ponderados.

Seleção dos Cromossomos^{5, 11} – Essa etapa é dividida em 2 partes, a primeira é chamada de *Seleção Natural*, na qual são mantidos os cromossomos de melhor performance e os demais são descartados. O número de cromossomos que sobrevivem para a próxima etapa, o cruzamento, é arbitrário. Manter poucos cromossomos limita o número de genes para a próxima geração, já manter muitos permite que cromossomos com baixa performance contribuam para as próximas gerações. Normalmente, são mantidos 50% dos cromossomos, ou seja, $M/2$.

A segunda parte dessa etapa consiste em formar os pares de cromossomos geradores da próxima geração. Dois cromossomos são selecionados para gerarem dois novos descendentes. Os GA apresentam uma grande variedade de métodos de seleção, sendo os mais utilizados descritos brevemente abaixo:

1. *De cima para baixo.* Os cromossomos que sobreviveram a seleção natural são combinados dois a dois em sequência do topo da lista até o seu fim.
2. *Aleatório.* Os cromossomos são escolhidos aleatoriamente, geralmente é usado um gerador aleatório uniforme como seletor.
3. *Aleatório Ponderado.* Esse tipo de seleção é conhecido como Roleta Ponderada. A seleção ainda é aleatória, porém a probabilidade de um cromossomo ser selecionado é diretamente proporcional à sua performance, ou seja, cromossomos com melhor performance tem maior probabilidade de serem escolhidos que os de pior.
4. *Competição.* Essa é abordagem tenta imitar a competição natural pelo acasalamento. Nela é selecionado um conjunto aleatório de cromossomos (normalmente 2 ou 3) e aquele com melhor performance é selecionado. A competição é repetida para cada um dos cromossomos geradores.

Cruzamento^{5,11} – Com os cromossomos geradores selecionados, os descendentes são gerados a partir da troca de material genético do par. Para isso é determinado aleatoriamente um ponto de corte num cromossomo gerador, o conjunto de bits a esquerda será passado para o primeiro descendente, que terá seu cromossomo completado pelo conjunto de bits restantes a direita do outro gerador. O processo inverso é realizado para o segundo descendente, com os bits a esquerda do segundo gerador completados pelos bits a direita do primeiro gerador, como exemplificado abaixo:

Tabela 2 – Exemplo de cruzamento de cromossomos

Gerador 1	<u>1100110</u> <u>01111</u>
Gerador 2	<u>0001001</u> <u>01001</u>
Descendente 1:	<u>1100110</u> <u>01001</u>
Descendente 2:	<u>0001001</u> <u>01111</u>

Mutação^{5, 11} – Nesse ponto, mutações aleatórias são introduzidas à uma pequena porcentagem da população, de modo a evitar que o algoritmo fique preso em um mínimo local da função f de performance. As mutações consistem em inverter um bit, ou seja, transforma um bit 1 em 0 e vice-versa. São aleatoriamente selecionadas dentro do total de bits da população ($M \times N_{\text{bits}}$), tipicamente, a taxa de mutação por iteração é da ordem de 1%. Geralmente, para manter a melhor solução não é permitido mutação em seus bits, sendo esse processo chamado de *elitismo*.

Nova geração^{5, 11} – Após $M/2$ cromossomos sobreviver a seleção natural, ser cruzados entre si e gerar um conjunto de $M/2$ filhos, é obtido uma nova geração com M cromossomos (o mesmo número de cromossomos que a geração inicial).

Convergência⁵ – A nova geração passará por uma nova avaliação de performance e será submetida a todas as etapas descritas anteriormente até que o algoritmo converja. A convergência é dada quando a especificação desejada é alcançada ou quando um número de iterações é excedido. Após certo número de iterações os cromossomos e suas performances não variam mais, isso quando não são submetidos a mutações (no caso do elitismo). Nesse ponto o algoritmo deve parar.

4.5 ESPECIFICAÇÕES DA QUINTA GERAÇÃO DA TELEFONIA MOVEL

Nesse trabalho utilizaremos como banda de interesse para o desenvolvimento das antenas fractais a faixa de frequência de operação da quinta geração da telefonia móvel. Para isso, essa seção traz algumas especificações dessa tecnologia, úteis para o desenvolvimento desse trabalho.

A interface aérea ou tecnologia de acesso da quinta geração da telefonia móvel é definida como *5G New Radio* (5G NR). Ela tem sua faixa de frequência de operação dividida em duas diferentes bandas²⁴:

- **Faixa de Frequência 1 (FR1)** – Bandas de frequência sub-6 GHz, algumas das quais são bandas tradicionalmente usadas em gerações anteriores, mas foi estendida para cobrir potenciais novas ofertas de espectro de 617 MHz a 7125 MHz.
- **Faixa de Frequência 2 (FR2)** – Inclui banda de 24,25 GHz a 52,6 GHz.

Sendo de elevada complexidade de trabalho e limitação laboratorial, a FR2 foi excluída do escopo desse trabalho.

A FR1 possui 55 bandas de operação, porém muitas delas se sobrepõem, assim, a Tabela 3 resume quais são as faixas de frequência que atendem todas as 55 bandas e serão utilizadas no desenvolvimento das antenas.

Tabela 3 – Faixas de Frequência da FR1.

	Frequência inicial [MHz]	Frequência final [MHz]
Faixa 1	617	960
Faixa 2	1427	1518
Faixa 3	1695	2020
Faixa 4	2110	2200
Faixa 5	2300	2400
Faixa 6	2480	2690
Faixa 7	3300	4200
Faixa 8	4400	5000
Faixa 9	5150	7125

5 MATERIAIS E MÉTODOS

A seguir são descritos os principais recursos disponíveis no LME/USP que serão utilizados para o desenvolvimento do trabalho:

- Programas de simulação computacional EM-3D:
 - ADS 2021 Update 1 – Momentum e FEM, da Agilent Technologies;
 - CST Studio Suite – Microwave Studio, da Computer Simulation Technology;
- Fabricação de circuitos integrados de micro-ondas:
 - Substratos de micro-ondas;
 - Conectores;
 - Serviço de fotogravação ou microfresa;
 - Serviço de oficina mecânica;
- Caracterização de circuitos integrados de micro-ondas:
 - Instrumentos de medidas elétricas em faixa de micro-ondas
 - Analisador de redes vetorial HP8722D, da Hewlett-Packard;
 - Analisador de redes vetorial HP8510B, da Hewlett-Packard;
 - Geradores de sinal em faixa de micro-ondas;

As medidas de radiação das antenas serão realizadas em câmara anechoica (home-made) do LME/USP.

6 CRONOGRAMA DE EXECUÇÃO

Com base nos objetivos e na metodologia de trabalho propostos, delineou-se o cronograma de execução, que é apresentado na Tabela 4.

Tabela 4 – Cronograma previsto de atividades

Etapa	Quadrimestre					
	2021			2022		
	1º	2º	3º	1º	2º	3º
Estudo bibliográfico de configurações de antenas fractais de microfita.						
Estudo e análise de algoritmos computacionais focados em otimização.						
Avaliação e seleção dos programas mais adequados para simulações computacionais EM-3D (ADS e CST Studio Suite) em conjunto com a linguagem de programação para implementação do algoritmo de otimização.						
Implementar as rotinas de execução dos algoritmos de otimização.						
Redação e defesa do exame de qualificação.						
Estudo e definição de especificações de antenas fractais para aplicação em sistemas de telefonia móvel						
Projeto das antenas especificadas.						
Simulações computacionais EM-3D das projetadas e otimização de seus parâmetros geométricos.						
Fabricação das antenas projetadas						
Medidas de parâmetro S_{11} das antenas construídas						
Medidas de diagramas de radiação das antenas construídas						
Análises comparativas de resultados						
Redação e defesa da dissertação de mestrado						

Legenda:  Previsto  Realizado

7 DESENVOLVIMENTO DE ATIVIDADES

Nessa seção é apresentado o desenvolvimento das atividades da pesquisa, descrevendo as atividades já concluídas, as atividades que estão em andamento e, por fim as atividades futuras da pesquisa.

7.1 ATIVIDADES CONCLUÍDAS

No presente momento do trabalho, encontram-se concluídos o estudo e a pesquisa bibliográfica iniciais sobre configurações de antenas de microfita e geometria fractal, resultando na seção de princípios teóricos deste documento. Naturalmente, a etapa de estudo bibliográfico terá continuidade ao longo do trabalho, dado que novas publicações nas áreas de interesse do trabalho vêm surgindo constantemente na literatura técnica. Também foram obtidos todos os créditos de disciplinas de pós-graduação requisitados para a conclusão do curso de mestrado.

Preliminarmente, foi realizada uma etapa de avaliação e seleção dos programas de simulação computacional EM-3D utilizados no trabalho, que são ADS da *Keysight Technologies*, mais especificamente os componentes Momentum e FEM, e CST Studio Suite, mais especificamente o componente Microwave Studio. Com base nos recursos disponíveis em cada programa, optou-se pela utilização do programa ADS para simulações preliminares de antenas e pela utilização do programa CST Studio Suite para as simulações finais de todas as antenas.

Em seguida, foi dedicado esforço para familiarização e domínio das configurações e simulações do ADS. Num segundo momento foi necessário o aprendizado da linguagem de programação proprietária da *Keysight Technologies*, o AEL. Nesse trabalho, ela será utilizada para a automatização do desenho das estruturas das antenas e configurações de parâmetros de simulação dentro do ambiente do ADS.

Dentre os algoritmos de otimização foi avaliado e selecionado o algoritmo genético, devido a sua simplicidade de implementação. Para a implementação do algoritmo genético foi desenvolvido o aprendizado da linguagem de programação Python, a qual foi selecionada devido a sua fácil integração com o ambiente de simulação da *Keysight Technologies*.

De modo a validar o algoritmo implementado em Python e sua integração com o ambiente do ADS, foram executadas rotinas de otimização em antenas de placa de microfita retangular. O objetivo é otimizar o formato da placa e a posição de alimentação usando GA para encontrar a resposta com maior número de pontos com valor de S_{11} igual ou menor que -10 dB em uma dada faixa de frequências.

Para validação do algoritmo implementado, adotou-se uma placa com 28 x 28 mm sobre um substrato de 44 x 44 mm, espessura de 1,6 mm e constante dielétrica ϵ_r 4,6 (FR4). Para buscar a melhor solução, a área da placa foi dividida em 16 células de 7 x 7 mm, como demonstrado na Figura 16. Células menores ajudam a obter melhores estruturas, mas consomem mais tempo de simulação, e como o objetivo aqui era apenas validar o funcionamento do GA integrado ao ADS, foi escolhido um número reduzido de células. Como apenas dois valores são possíveis por célula (estar ou não estar presente) uma codificação binária foi utilizada. A geometria das placas é simétrica em relação ao eixo y, portanto, somente metade das células foram codificadas no GA, assim, os 8 primeiros bits do cromossomo foram usados para descrever todas as células. A antena é alimentada por uma linha coaxial de 50 Ω e para posição de alimentação foram atribuídos mais 4 bits. Portanto, um cromossomo consiste em 12 genes numerados de 0 a 11. A Figura 17 mostra alguns exemplos de formato de placas obtidos ao longo do processo de otimização.

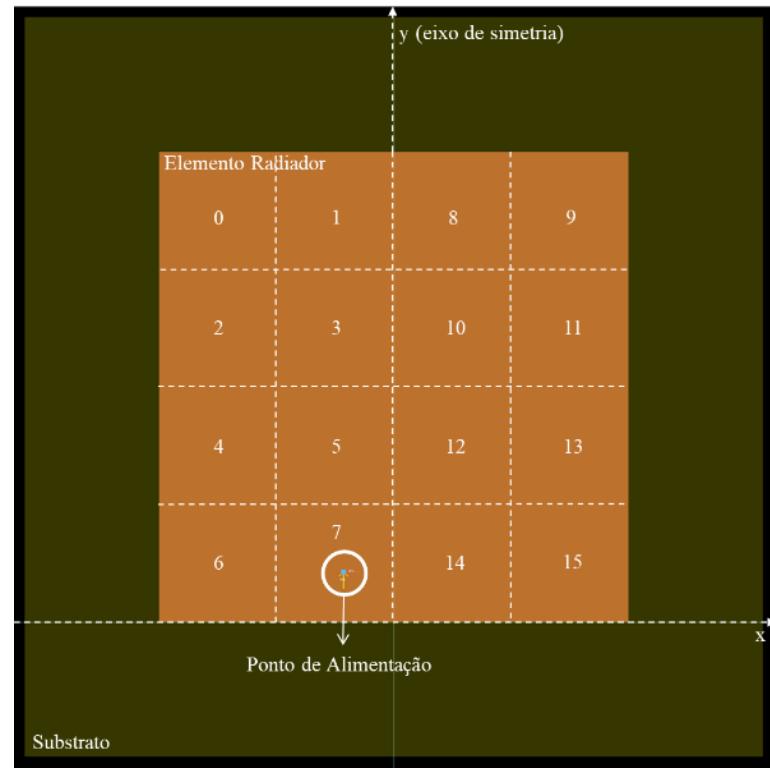


Figura 16 – Antena de placa dividida em 16 células.

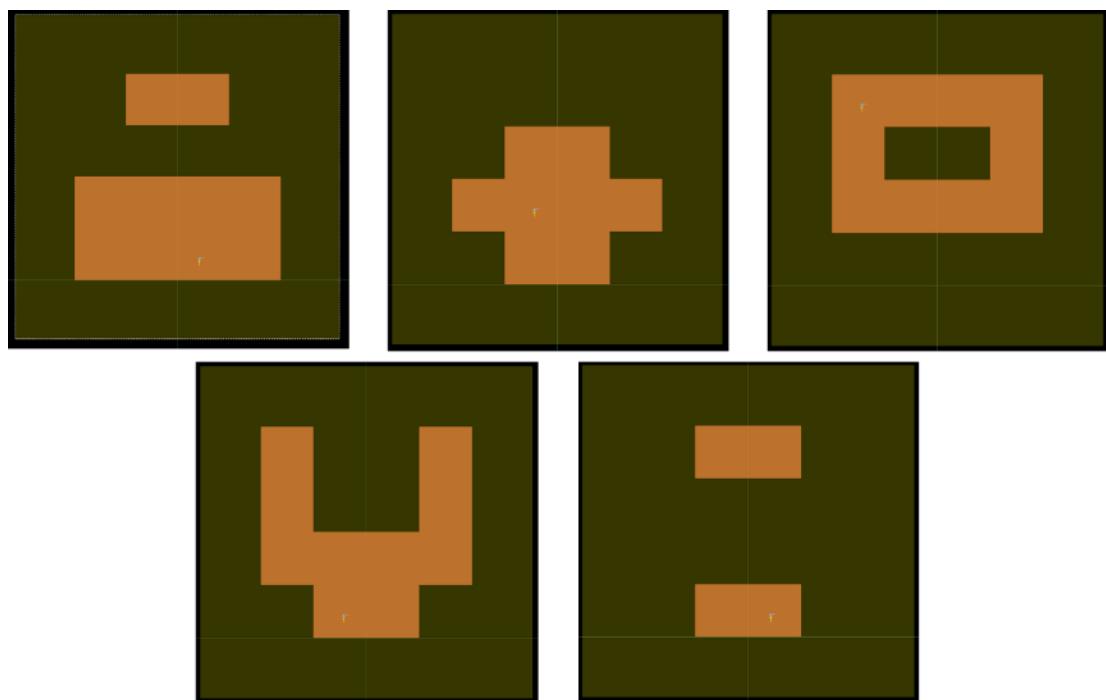


Figura 17 – Exemplos de formatos de placetas ao longo do processo de otimização.

A função performance f foi definida como a soma do número de pontos com valor de coeficientes de reflexão (S_{11}) menor que -10 dB ao longo do intervalo de 0 a 5 GHz com total de 515 pontos. Assim, a função é escrita como:

$$f = \left(\sum_{n=1}^{515} L(n) \right)$$

Onde L é definido como:

$$L = \begin{cases} 0 & \text{se } S_{11} > -10 \text{ dB} \\ 1 & \text{se } S_{11} \leq -10 \text{ dB} \end{cases}$$

Observe-se que da forma que a função f foi definida, o valor máximo de f pode ser de uma antena com uma banda larga, várias bandas estreitas ou uma única banda dentro do intervalo de 0 a 5 GHz. Essa função teve como objetivo testar o algoritmo desenvolvido quanto a sua capacidade de gerar as estruturas das antenas e simulá-las no ADS. Portanto, futuramente serão desenvolvidas funções f capazes de direcionar a soluções a atender às especificações das antenas a serem projetadas.

A seguir são listados os parâmetros utilizados no GA foram utilizados:

- O tamanho da população é de 20 cromossomos por geração
- Probabilidade de cruzamento de 90%;
- Mutação de 1 bit de 1/número de células = 6,25%;
- Método de seleção usado foi o de Competição, com o melhor resultado sendo preservado a cada geração.

O critério de finalização do algoritmo foi o número de gerações, no caso 8 que possibilitou a simulação de 160 formatos de plaquetas e apresentou razoáveis características de convergência.

Para avaliar as características de convergência do GA, é usualmente construído um gráfico dos melhores valores da função performance f ao longo das gerações. Assim, a Figura 18 mostra a evolução dos melhores valores e a média da função performance através das gerações.

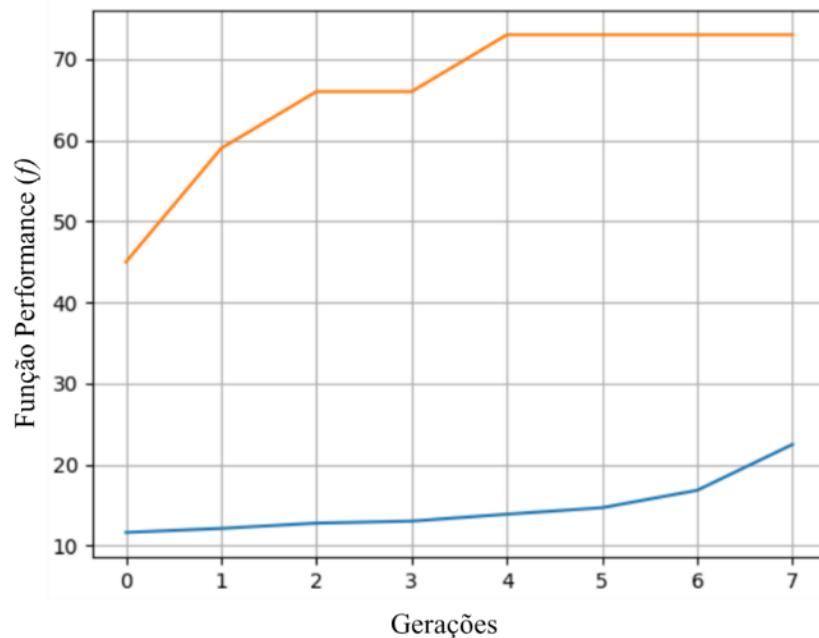
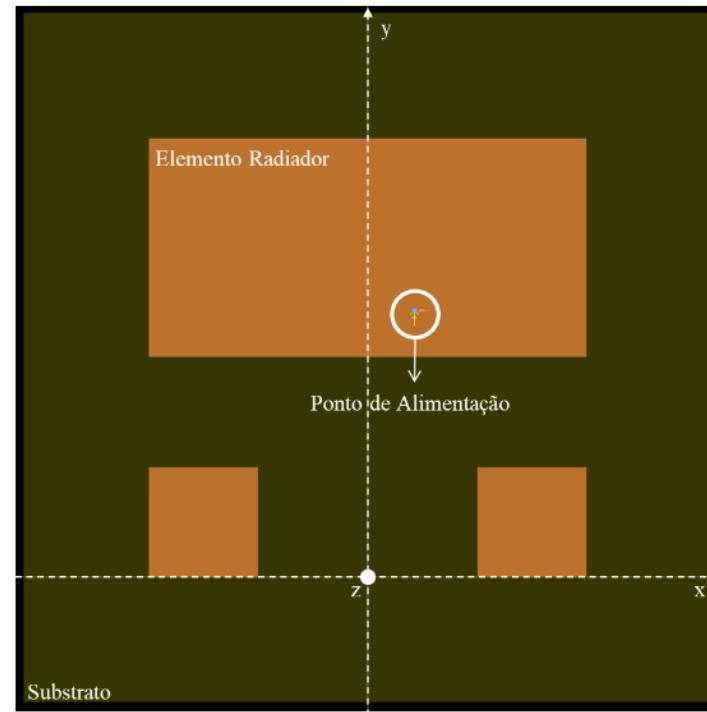
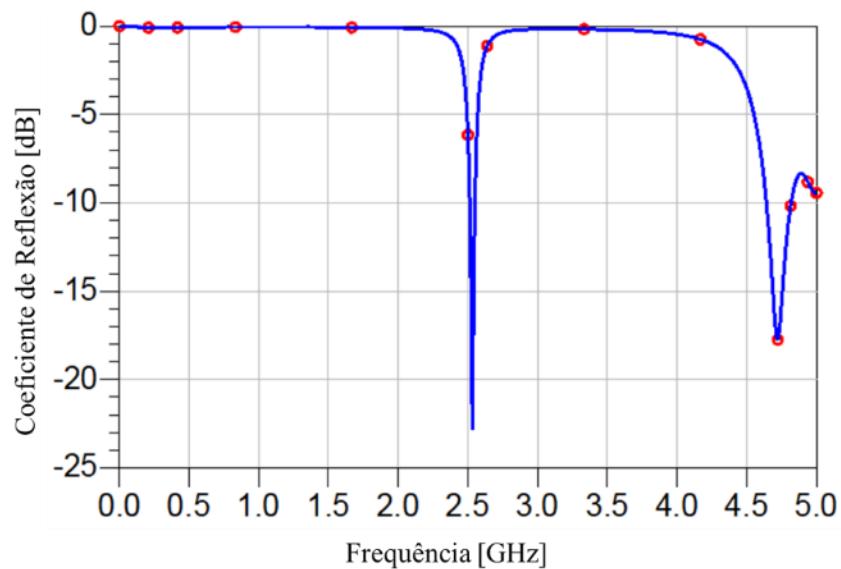


Figura 18 – Gráfico com os melhores valores da função performance (em laranja) e a média dos valores da função de todos os cromossomos da geração (em azul) ao longo das gerações.

Por fim, a antena que resultou em maior número de pontos com $S_{11} \leq -10 \text{ dB}$ apresentou uma performance de $f = 73$. Sua estrutura é apresentada na Figura 19a, seguida pelo gráfico dos valores do coeficiente de reflexão por frequência (Figura 19b).



(a)



(b)

Figura 19 – Antena com melhor performance após otimização com GA. (a) Estrutura da Antena, (b) Coeficiente de reflexão por frequência.

A seguir são apresentados nas Figura 20 os diagramas de radiação dessa antena nas frequências de menor valor de coeficiente de reflexão. Nessas frequências os valores máximos de ganho obtidos foram 3,2 dBi em 2,5 GHz e 5,6 dBi em 4,72 GHz.

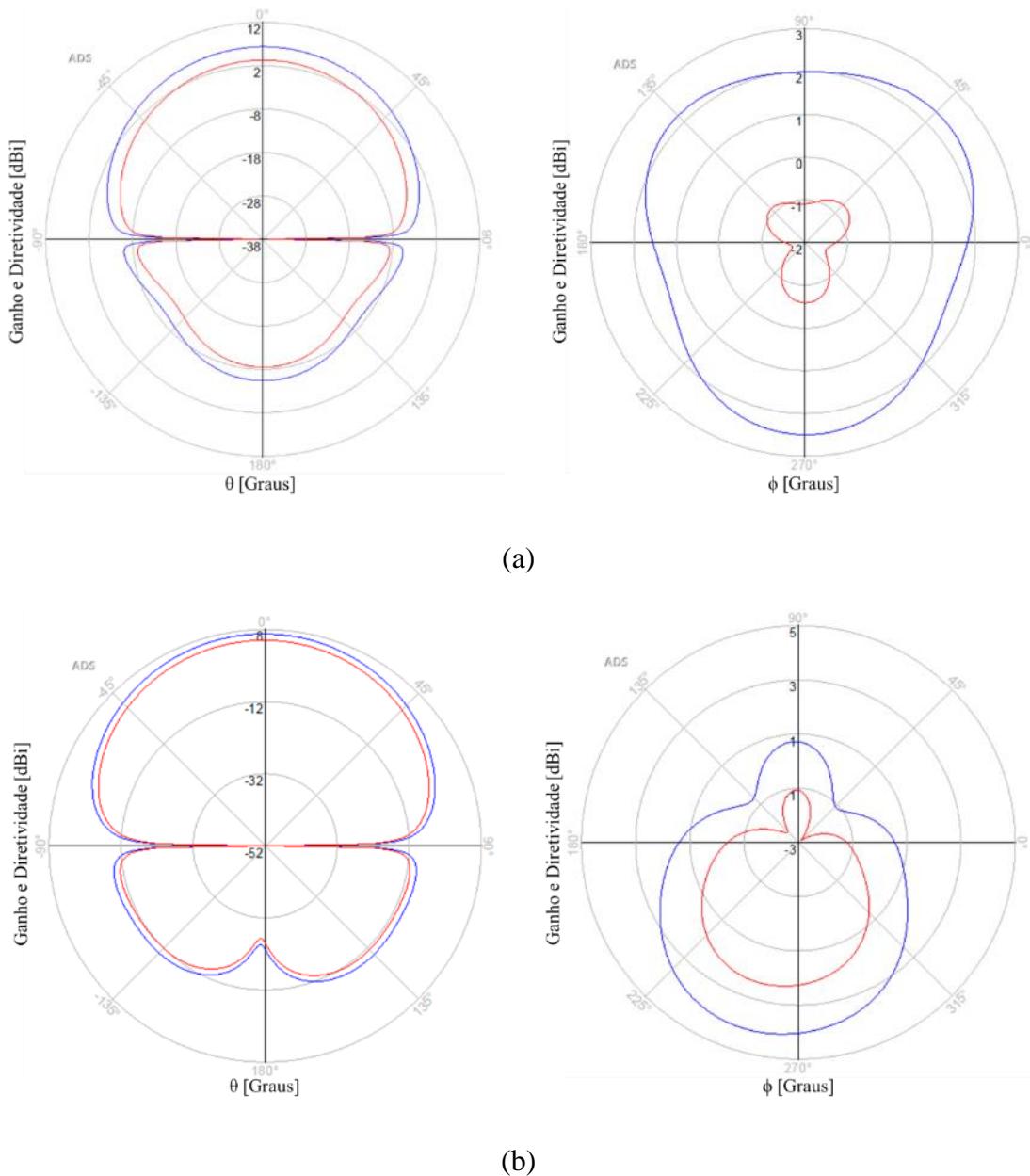


Figura 20 – Diagramas de radiação da antena com melhor performance após otimização com GA nas frequências de 2,53 GHz (a) e 4,72 GHz (b). A diretividade está representada em azul e o ganho em vermelho. O corte do gráfico à esquerda é em $\phi = 0^\circ$ ou seja no plano xz e o da direita em $\theta = 60^\circ$.

A antena apresentou uma polarização predominantemente horizontal (sentido do eixo x) em 2,5 GHz, conforme apresentada na Figura 21a. Já em 4,72 GHz a polarização obtida foi elíptica devido a um componente vertical (Figura 21b) que surge devido a dimensão y da antena e seu ponto de alimentação.

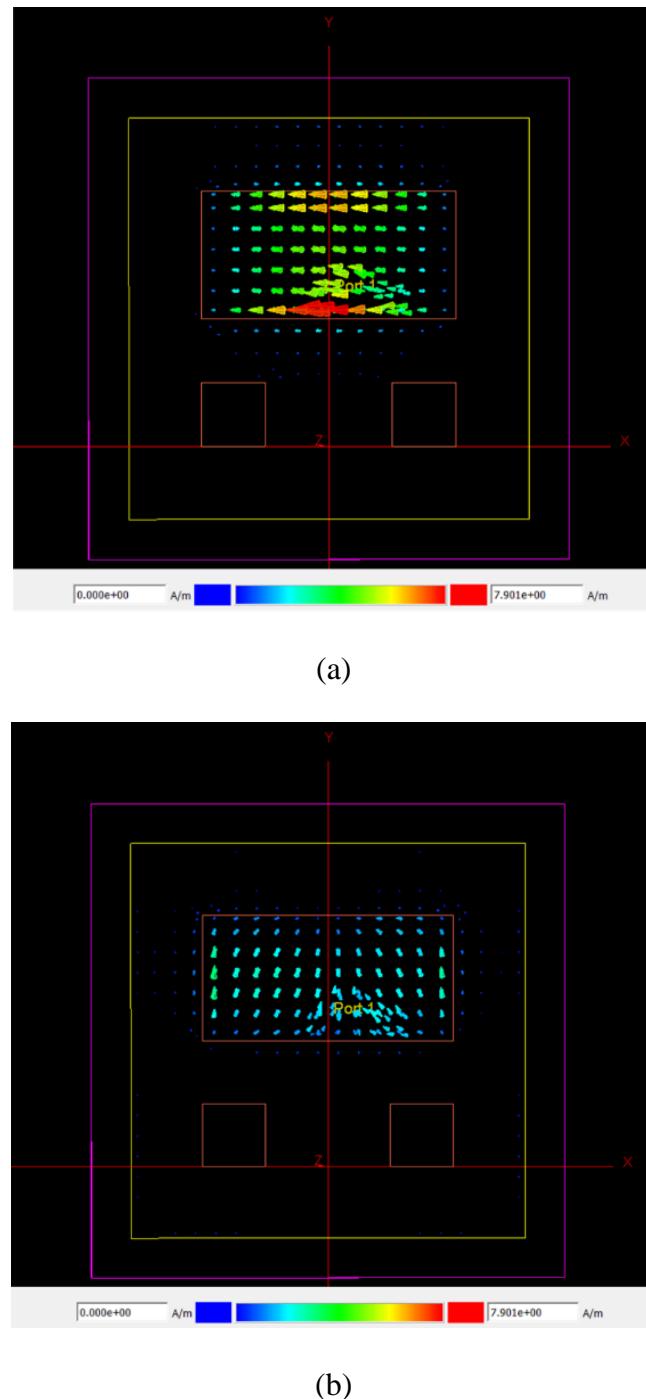
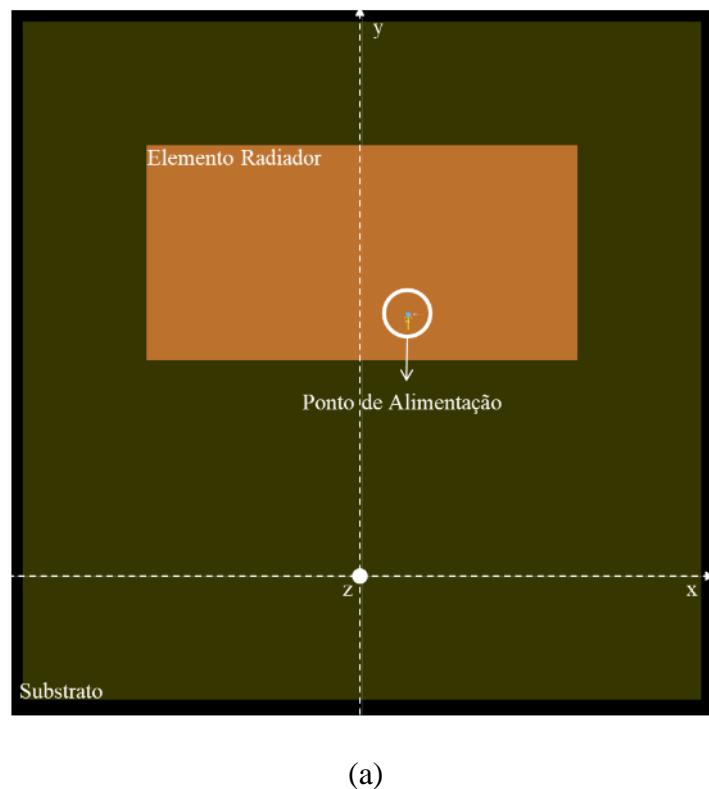
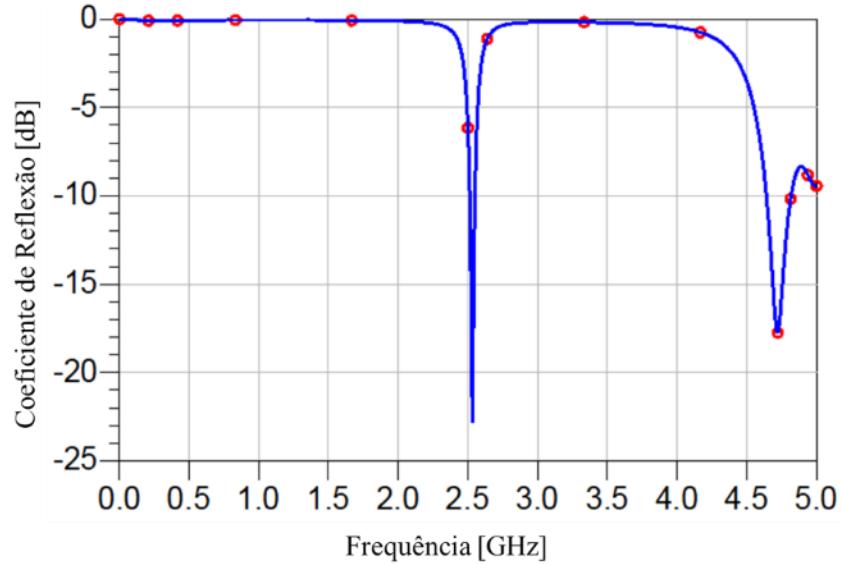


Figura 21 – Distribuição de Corrente ao longo da estrutura da antena com melhor performance após otimização com GA. (a) Em 2,5 GHz e (b) em 4,72 GHz.

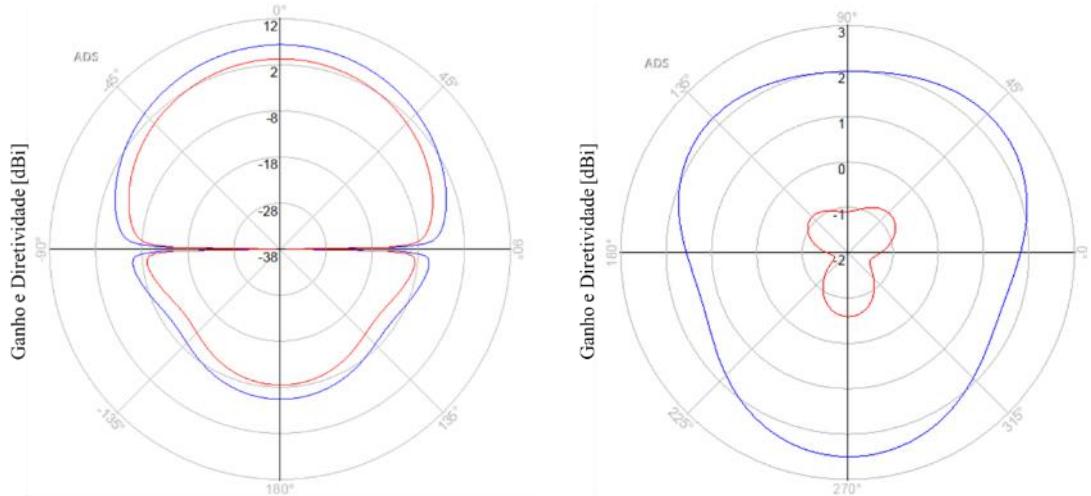
Além das polarizações, outra característica que pode ser observada ao analisar a distribuição de corrente em ambas as frequências de operações é que não há contribuição alguma dos elementos radiadores desconectados da alimentação. Portanto, para validar essa afirmação, uma nova antena foi simulada sem a presença desses elementos. A Figura 22 apresenta a estrutura da antena (a) e a resposta do coeficiente de reflexão em frequência (b) e na Figura 23 os diagramas de radiação em 2,5 GHz e 4,72 GHz respectivamente, não se observando diferenças perceptíveis entre esses resultados e os apresentados na Figura 20.





(b)

Figura 22 – Antena sem os elementos radiadores desconectados da alimentação. (a) Estrutura da Antena, (b) Coeficiente de reflexão por frequência.



(a)

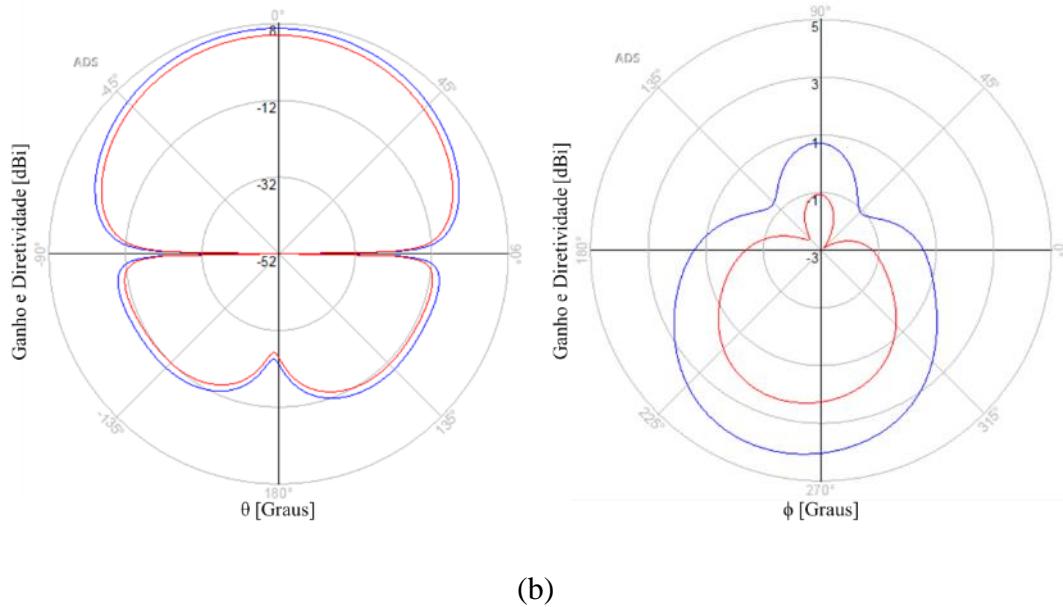


Figura 23 – Diagramas de radiação da antena sem os elementos radiadores desconectados da alimentação nas frequências de 2,53 GHz (a) e 4,72 GHz (b). A diretividade está representada em azul e o ganho em vermelho. O corte do gráfico à esquerda é em $\phi = 0^\circ$ ou seja no plano xz e o da direita em $\theta = 60^\circ$.

Com esses resultados fica exposta mais uma limitação da função performance f utilizada, que gerou uma antena cujo desempenho poderia ser obtido por uma antena com leiaute de menor complexidade. Em vista disso, durante a definição das funções performance a serem utilizadas na sequência deste trabalho, procurar-se-á evitar essa limitação.

7.2 ATIVIDADES EM ANDAMENTO

Estando concluídos os estudos e desenvolvimentos anteriores, que tinham como objetivo o estabelecimento da base para o desenvolvimento do trabalho, foram iniciadas as etapas de definição de especificações de antenas fractais, projeto das antenas e suas simulações computacionais EM-3D e otimização de seus parâmetros geométricos. Essas etapas encontram-se atualmente em andamento. Maiores detalhes são apresentados a seguir.

- *Estudo e definição de especificações de antenas fractais para aplicação em sistemas de telefonia móvel*

Estão sendo feitas análises para a seleção dos melhores fractais a serem usados para a aplicação em sistemas de telefonia móvel de quinta geração. Também estão em avaliação diversos substratos diferentes para utilização nas antenas.

Outro ponto sendo avaliado é a melhor forma de descrever a performance de uma antena através da função f . Sendo ela crucial para alcançar os objetivos desse trabalho.

- *Projeto das antenas especificadas*

Nessa etapa estão sendo desenvolvidos os códigos em AEL para o desenho das estruturas fractais das antenas. Até então, esses códigos têm como parâmetros de entrada as dimensões da antena e o número de iterações do fractal, que serão parâmetros a serem otimizados pelo GA, sendo codificados como genes dos cromossomos do algoritmo. Obviamente, outros parâmetros ainda serão implementados como genes, conforme as definições das especificações a serem alcançadas

Os códigos para geração dos fractais de Sierpinski na janela de leiaute do ADS já foram desenvolvidos em linguagem AEL e as Figura 24 mostram alguns exemplos obtidos com esses códigos.

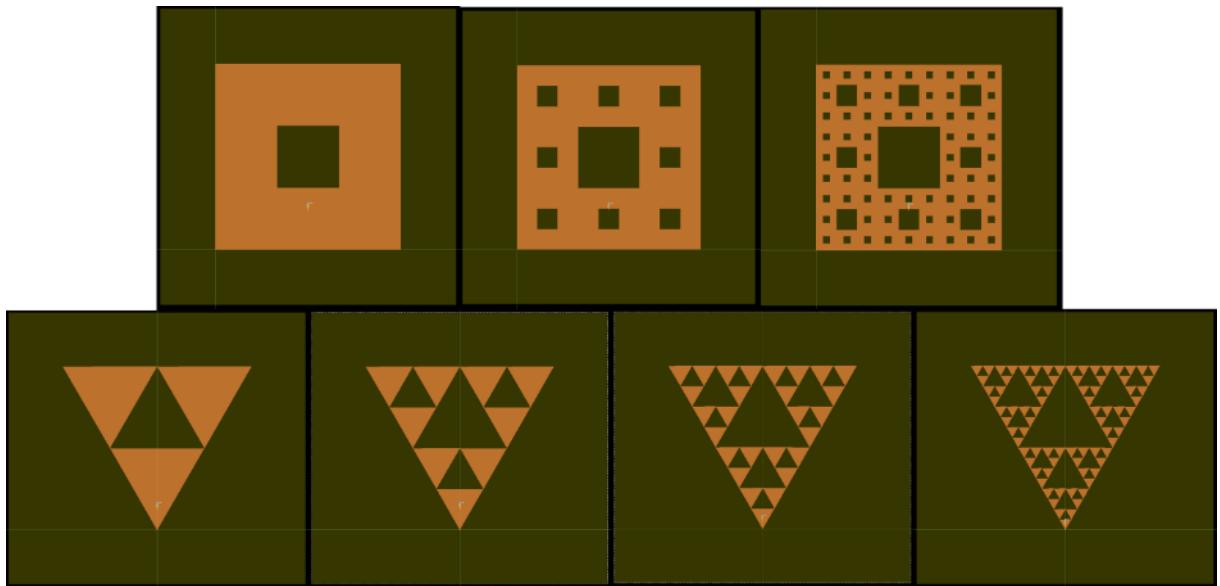


Figura 24 – Antenas fractais desenhadas através de linguagem de programação AEL.

- Simulações computacionais EM-3D das antenas projetadas e otimização de seus parâmetros geométricos

Essa etapa vem se mostrando bastante desafiadora, nela estão sendo tratados aspectos de otimização do GA, como a implementação de uma base de dados com resultados anteriores, que evitam a simulação desnecessária de cromossomos já simulados. Também estão sendo incorporados ao código meios de evitar erros ao longo da execução do algoritmo.

Além das otimizações no próprio código Python, mostrou-se necessário algumas adaptações em partes do código para a sua utilização com antenas de dimensões maiores que as da antena usada na validação do código, geometria fractais e cromossomos longos.

Um meio que vem sendo buscado para resolver os problemas com os cromossomos longos é a utilização de uma codificação eficiente dos parâmetros da antena, como por exemplo, aspectos de simetria.

Em relação à função performance f , vem sendo implementada uma nova função visando otimizar o desempenho da antena nas bandas de operação da quinta geração de telefonia móvel apresentadas na Tabela 3. Essa função foi testada preliminarmente com a antena de placa.

usada para validar o algoritmo. O resultado obtido foi o mesmo apresentado na sessão de Atividades Concluídas, dado que as bandas da antena com melhor performance coincidem com algumas bandas de operação da quinta geração de telefonia móvel, mas a integração da nova função f ao algoritmo foi validada. Entretanto, a elaboração da função performance f ainda não está concluída, e mais considerações serão feitas.

7.3 ATIVIDADES FUTURAS

Estando concluídas as atividades atualmente em andamento, pretende-se seguir com as atividades seguintes previstas no cronograma de execução do trabalho:

- Simulações e otimização das antenas projetadas;
- Fabricação das antenas projetadas;
- Medidas do parâmetro S_{11} e diagramas de radiação das antenas construídas;
- Análise comparativa dos resultados medidos e simulados;
- Redação de Artigos e Dissertação;

8 SUMÁRIO ESTRUTURADO DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Segue abaixo o sumário estruturado previsto para a dissertação de mestrado:

1 INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

2 OBJETIVOS

3 PRINCÍPIOS TEÓRICOS

3.1 PRINCIPIOS FUNDAMENTAIS DE ANTENAS

3.1.1 Largura de Banda

3.1.2 Impedância de Entrada

3.1.3 Polarização

3.1.4 Diagrama de radiação

3.1.5 Ganho e sua Planicidade

3.2 ANTENAS DE MICROFITA

3.3 GEOMETRIA FRACTAL

3.3.1 Fractais de estrutura recorrente simples

3.3.2 Dimensão fractal e dimensão de Hausdorff

3.3.3 Antenas Fractais

3.4 ALGORITMO GENETICO E TECNICAS DE OTIMIZAÇÃO

3.5 ESPECIFICAÇÕES DA QUINTA GERAÇÃO DA TELEFONIA MOVEL

4 ESPECIFICAÇÕES DE ANTENAS FRACTAIS DE MICROFITA

4.1 Especificações propostas

4.2 Simulação computacional EM-3D e otimização das especificações propostas

4.3 Discussão dos resultados de simulação

5 DESENVOLVIMENTO DE PROTÓTIPOS DE ANTENAS FRACTAIS DE MICROFITA

5.1 Especificações das antenas projetadas

5.2 Fabricação das antenas projetadas

5.3 Caracterização das antenas projetadas

5.4 Análise comparativa entre resultados experimentais e de simulação

6 CONCLUSÕES

REFERÊNCIAS

REFERÊNCIAS

- 1 BALANIS, C. A. **Antenna Theory: Analysis and Design**. 3rd ed. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2005.
- 2 GUHA, D.; ANTAR, Y.M.M. et al. **Microstrip and Printed Antennas: New Trends, Techniques and Applications**. 1st ed. John Wiley & Sons, Inc., 2011.
- 3 VOLAKIS, J. L. **Antenna Engineering Handbook**. 4th ed. McGraw-Hill Education, 2007.
- 4 GARG, R. et al. **Microstrip Antenna Design Handbook**. Norwood: Artech House, Inc., 2001.
- 5 HAUPT, R. L.; HAUPT, S. E. **Practical genetic algorithms**, 2nd edition, John Willey & sons, Inc., 2004.
- 6 CISCO AIR WHITE PAPER, **Cisco Annual Internet Report (2018 – 2023)**, Cisco Public Information, Mar. 2020.
- 7 M. SERIES, **IMT vision—Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond**, 2015.
- 8 GIANVITTORIO, J. P.; RAHMAT-SAMII, Y. **Fractal antennas: a novel antenna miniaturization technique, and applications**, in IEEE Antennas and Propagation Magazine, vol. 44, no. 1, pp. 20-36, Feb. 2002, doi: 10.1109/74.997888.
- 9 ANGUERA, J.; ANDÚJAR, A.; JAYASINGHE, J.; CHAKRAVARTHY, V.V.S.S.S.; CHOWDARY, P.S.R.; PIJOAN, J.L.; ALI, T.; CATTANI, C. **Fractal Antennas: An Historical Perspective**. *Fractal Fract.* **2020**, 4, 3. <https://doi.org/10.3390/fractfract4010003>.
- 10 JAYASINGHE, J. M. J. W.; UDUWAWALA, D. N. **A broadband triple-frequency patch antenna for WLAN applications using genetic algorithm optimization**, 2012 IEEE 7th International Conference on Industrial and Information Systems (ICIIS), Chennai, India, 2012, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICIInfS.2012.6304772.

- 11 HAUPT, R. L. **An introduction to genetic algorithms for electromagnetics**, in IEEE Antennas and Propagation Magazine, vol. 37, no. 2, pp. 7-15, April 1995, doi: 10.1109/74.382334.
- 12 COHEN, N. **Fractal coding in genetic algorithm (GA) antenna optimization**, IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium 1997. Digest, 1997, pp. 1692-1695 vol.3, doi: 10.1109/APS.1997.631502.
- 13 DESCHAMPS, G. A.; SICHAK, W. **Microstrip Microwave Antennas**. In: SYMPOSIUM ON THE USAF ANTENNA RESEARCH AND DEVELOPMENT PROGRAM, 3., 1953, Alerton. Proceedings of the IEEE, Piscataway: Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 1953. p. 18-27.
- 14 HOWELL, J. Q. **Microstrip Antennas**. In: IEEE ANTENNAS AND PROPAGATION SOCIETY INTERNATIONAL SYPOSIUM, 1972, Williamsburg. **Digest...** Piscataway: Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 1972. p. 177-180.
- 15 MUNSON, R. E. **Conformal Microstrip Antennas and Microstrip Phased Arrays**. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Piscataway, v. 22, n. 1, p.74-78, Jan. 1974.
- 16 KUMAR, G.; RAY, K. P. **Broadband Microstrip Antennas**. Norwood: Artech House, Inc., 2003.
- 17 JAMES, J. R.; HALL, P. S.; **Handbook of Microstrip Antennas**. London: Peter Peregrinus Ltd., 1989.
- 18 POZAR, D. M. **Microstrip Antennas**. Proceedings of the IEEE, Piscataway, v. 80, n. 1, p. 79-91, Jan. 1992.
- 19 WOOD, C. **Curved Microstrip Lines as Compact Wideband Circularly Polarized Antennas**. IEEE Journal on Microwaves, Optics and Acoustics, Piscataway, v. 3, n. 1, p. 5-13, Jan. 1979.
- 20 BECK, C.; SCHLÖGL, F. **Thermodynamics of Chaotic Systems: An Introduction**, Cambridge Nonlinear Science Series, vol. 4, Cambridge University Press, 1995.

- 21 ASSIS, T. A. de et al. **Geometria fractal: propriedades e características de fractais ideais.** Revista Brasileira de Ensino de Física 2008, v. 30, n. 2, pp. 2304.1-2304.10
- 22 SCHLEICHER, D. **Hausdorff Dimension, Its Properties, and Its Surprises**, The American Mathematical Monthly 2007, 114:6, 509-528, DOI: 10.1080/00029890.2007.11920440
- 23 COHEN, N. **Fractal Antennas Part 1.** Communications Quarterly: 12 sidebar, 'The First Fractal Antenna'. ISSN 1053-9433.
- 24 3GPP. **TS 38.101-1: NR; User Equipment (UE) radio transmission and reception; Part 1: Range 1 Standalone** (17.1.0 ed.). 3GPP. 2021-04-13. Retrieved 2021-04-26.