UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO

CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS

COORDENAÇÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE COMPUTAÇÃO E SISTEMAS

DESENVOLVIMENTO DE UMA ANTENA MONOPOLO DIRECIONAL BIOINSPIRADA EM FOLHA ELÍPTICA COM CORTES DE ACORDO COM O NÚMERO DE OURO PARA APLICAÇÕES WLAN E 4G

Eduarda Froes dos Santos

Orientador: Prof. Dr. Mauro Sérgio Silva Pinto
Coorientador: Prof. Dr. Paulo Fernandes da Silva Junior

2022

Eduarda Froes dos Santos

DESENVOLVIMENTO DE UMA ANTENA MONOPOLO DIRECIONAL BIOINSPIRADA EM FOLHA ELÍPTICA COM CORTES DE ACORDO COM O NÚMERO DE OURO PARA APLICAÇÕES WLAN E 4G

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Computação e Sistemas da Universidade Estadual do Maranhão, como requisito necessário para obtenção do grau de Mestre em Engenharia da Computação e Sistemas.

Aprovada em: 21/12/2022

BANCA EXAMINADORA

Dr. CARLOS AUGUSTO DE MORAES CRUZ
Examinador (a) Externo à Instituição

Dr. EWALDO EDER CARVALHO SANTANA
Examinador Interno à Instituição

Dr. CARLOS HENRIQUE RODRIGUES DE OLIVEIRA
Examinador Interno à Instituição

Dr. PAULO FENRNANDES DA SILVA JUNIOR
Coorientador

DR. MAURO SERGIO SILVA PINTO
Presidente

São Luís
2022

Santos, Eduarda Froes dos.
Desenvolvimento de uma antena monopolo direcional bioinspirada em folha elíptica com cortes de acordo com o número de ouro para aplicações WLAN e 4G / Eduardo Fores dos Santos. – São Luís, 2022.
... 55f.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Computação e Sistemas, Universidade Estadual do Maranhão, 2022.

Orientador: Prof. Dr. Mauro Sérgio Silva Pinto.
Coorientador: Prof. Dr. Paulo Fernandes da Silva Júnior.

1.Antena direcional monopolo. 2.Folha elíptica. 3.Proporção áurea. 4.Banda 4G. I.Título.

CDU: 621.396.677

Dedico à Deus, sem Ele nada seria. Ao meu querido pai Valdeci (*in memoriam*), cujo empenho em me educar sempre veio em primeiro lugar. Aqui estão os resultados dos seus esforços. Com muita gratidão.
Ao meu amado João Mendonça (*in memoriam*) que sempre me apoiou nos meus sonhos e projetos.

AGRADECIMENTOS

Sou grata aos meus pais por sempre me incentivarem e acreditarem que eu seria capaz de superar os obstáculos que a vida me apresentou. Em especial à minha mãe, Edna Fróes que me acompanhou nessa caminhada, sendo suporte nos dias difíceis.

Gostaria de agradecer à Universidade Estadual do Maranhão, seu corpo docente e ao meu orientador que demonstraram estar comprometidos com a qualidade e excelência do ensino.

Agradeço ao meu coorientador, Paulo Fernandes por sempre estar presente para indicar a direção correta que o trabalho deveria tomar.

Também agradeço à minha amiga Michelly que sempre me ajudou e deu seu apoio desde o início deste projeto.

Sumário

Resumo 13
1. Introdução 15
1.1. Objetivos 17
1.1.1. Objetivo Geral 17
1.1.2. Objetivos Específicos 17
1.2. Problema e justificativa 17
1.2.1. Descrição do Problema 17
1.2.1. Justificativa 17
1.3. Organização do projeto 18
2. Metodologia 19
3. Fundamentação Teórica 21
3.1. Parâmetros Fundamentais 23
3.1.1. Diagrama de Radiação 23
3.1.2. Polarização 27
3.1.3. Diretividade e Ganho 29
3.1.4. Impedância e Largura de Banda 29
3.2. Antenas Monopolo Planar Direcional 33
3.3. Antenas Bioinspiradas 33
3.3.1. Fórmula de Gielis 34
3.3.2. Forma das Plantas 38
3.4. Proporção Áurea e o Número de Ouro (**Φ**) 38
4. Tecnologias WLAN e 4G 41
5. Resultados e Discussões 43
6. Considerações Finais 52
6.1. Trabalhos futuros 52
6.2. Publicações 53

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Ilustração de antenas filamentares. 21
Figura 3.2 – Ilustração de antenas de abertura. 22
Figura 3.3 – Ilustração de antenas de microfita. 23
Figura 3.4 – Sistema de coordenadas de uma Antena. 24
Figura 3.5 – Diagrama de radiação Isotrópica. 25
Figura 3.6 – Diagrama de radiação Direcional. 26
Figura 3.7 – Diagrama de radiação Omnidirecional. 26
Figura 3.8 – Identificação do Plano-E e Plano-H de duas antenas cornetas. 27
Figura 3.9 – Componentes do campo elétrico em função do tempo 28
Figura 3.10 – Estados de polarização: a) elíptica, b) circular, c) linear 28
Figura 3.11 – Circuito equivalente das perdas de uma antena com um gerador. 30
Figura 3.12 – Geometria das plantas e a sequência de Fibonacci. 39
Figura 3.13 – Exemplo do número de ouro na natureza. 40

Figura 5. 1 – Projeto das antenas monopolo planares simulados: a) antena de folha elíptica, com cortes e a forma quadrada; b) folhas e antena com as dimensões; c) protótipo. 44
Figura 5. 2 – Simulação das antenas monopolo planares: a) antena de folha elíptica e a forma quadrada; b) antena de folha elítica com e sem os cortes. 46
Figura 5. 3 – Comparação dos resultados simulados e medidos de antenas monopolos direcionais: a) folha elíptica; b) forma quadrada. 47
Figura 5. 4 – Comparação de resultados medidos de forma quadrada e antena monopolo direcional de folha elíptica. 48
Figura 5. 5 – Simulação da razão axial da antena monopolo bioinspirada na folha elíptica com abertura de acordo com o número de ouro. 49
Figura 5. 6 – Diagrama de radiação de antena monopolo direcional em folha elíptica: a) Ganho simulado, 3D realizado no Ansys 2016; b) HPBW simulado, 2D plano-E e plano-H realizado no Ansys 2016; c) Diagrama de radiação medido do monopolo bioinspirado com refletor; d) Diagrama de radiação simulado do monopolo bioinspirado com refletor realizado no Ansys 2016; e) Densidade de corrente simulada com antena monopolo realizada no Ansys 2016. 50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Imagens geradas pela expressão de Gielis com os parâmetros utilizados. 36
Tabela 2: Número de Lucas. 41
Tabela 3: Dimensões dos monopolos (mm).....44
Tabela 4: Resultados de antenas monopolo medidas (mm). 48
Tabela 5: Comparação das antenas direcionais monopolo bioinspiradas em folha elíptica e cana-de-açúcar [4].....51

LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

ATDMA – *Advanced Time Division Multiple Access*

BW – *Bandwidth* – Largura de banda

BW% - *Bandwidth factionary* – Largura de banda fracionária

CDMA – *Code Division Multiple Access*

CPW – *Coplanar Wave Guide* – Guia de Ondas Coplanar

DSRC – *Dedicated Short-Range Communications* – Comunicação Dedicada de Curto Alcance

EBG – *Electromagnetic Band Gap* – Abertura de Banda Eletromagnética

FA – Fator de arranjo de antenas

F/B – *Front-to-Back* – Relação Frente Costas

HPBW – *Half-Power Beamwidth* – Largura de Feixe de Meia Potência

PMA – *Printed Monopole Antenna* – Antena Monopolo Impressa

Plano-E – Corte paralelo ao campo elétrico

Plano-H – Corte perpendicular ao campo elétrico

RL – *Return Loss* – Perda de Retorno

UWB – *Ultra Wideband* – Banda Ultralarga

VNA – *Vectorial Network Analyzer* – Analisador de Redes Vetorial

VSWR – *Voltage Standing Wave Ratio* – Coeficiente de Onda Estacionária

WLAN – *Wireless Local Area Network*– Rede Local Sem Fio

c – Velocidade da luz no vácuo, aproximadamente 3.10^8 m/s

D – Diretividade

d – Distância entre os elementos de arranjo de antenas

dB – decibel

dBi – Ganho da antena

E– Intensidade de campo elétrico (V/m)

$\mathbf{E_t}$ – Campo elétrico total radiado

$\mathbf{E_\theta}$ – Componente do campo elétrico na direção do ângulo θ

$\mathbf{E_\varphi}$ – Componente do campo elétrico na direção do ângulo φ

$\boldsymbol{f_0}$ – Frequência de ressonância

f_1 – Frequência mais baixa banda em – 10 dB

f_2 – Frequência mais alta em – 10 dB

G – Ganho

g – Separação entre o plano de terra e o elemento radiante

Gbps – Gigabits por segundo

H – Intensidade de campo magnético (A/m)

h – Espessura do substrato de microfita

I – Corrente do circuito

I* – conjugado complexo de I

LTE - Long Term Evolution

kV – *Quilovolt*

MHz- *Megahertz*

MIMO – *Multiple input/multiple output* – Múltiplas entradas e múltiplas saídas

OFDM – *Orthogonal Frequency Division Multiplexing*

P – Potência do gerador

p – Perímetro do monopolo impresso

$P_{máx}$ – Potência máxima

P_n – Potência do lóbulo

P_r – Potência radiada

P_T – Potência total radiada

R – Raio de uma antena circular em microfita

r – Radio do diagrama de potência

R_A – Parte real ou resistiva da impedância da antena

$\boldsymbol{R_L}$ – Perda ôhmica

$\boldsymbol{R_r}$– Perda de radiação

$\boldsymbol{S}$ – Superfície próxima ao campo radiado

SIMO – *Single-input/ single-output system*

$\mathbf{u}_r$ – Vetor unitário na direção *r*

x – Eixo de coordenadas

$\boldsymbol{X_A}$ – Parte imaginária da impedância da antena

y – Eixo de coordenadas

$\mathbf{Z_A}$ – Impedância da antena.

ΔL – Comprimento do frangeamento em antenas de microfita

Γ – Coeficiente de reflexão

|Γ| – Módulo do coeficiente de reflexão

ε_r – Permissividade relativa de um dielétrico

ε_{ref} – Permissividade relativa efetiva

ε_0 - Permissividade do espaço livre

Φ – Número de Ouro

$\boldsymbol{\eta_a}$ – Eficiência

η_0– Impedância da onda no espaço livre – $\sqrt{\mu_0/\varepsilon_0}$

θ, φ – Ângulos em coordenas esféricas

$\theta_{máx}$ – Direção angular de máximo ganho

R– Parte real do número completo

U – Intensidade de radiação

THz- *Terahertz*

W – *Watt*

Resumo

Nesta Dissertação propõe-se o desenvolvimento de uma antena monopolo direcional, bioinspirada em folha elíptica, com corte por proporção áurea, para aplicação em banda 4G, pelo uso da técnica do corte do elemento radiante para o aumento do perímetro da antena, tratando-se do primeiro trabalho a utilizar a técnica em uma antena bioinspirada, promovendo a sintonia da frequência de ressonância, e a reconfiguração dos parâmetros da antena como largura de banda, diagrama de radiação e ganho, com o uso de um refletor próximo ao plano de terra, sem a inserção de dispositivos ativos, como o diodo pin ou mudança no elemento radiante. O formato da antena é gerado pela fórmula Gielis, construída em substrato FR4, com cortes calculados pela proporção áurea. Para comparar os resultados do monopolo bioinspirado na folha elíptica, foi projetada, simulada e medida uma antena monopolo em forma quadrada. As estruturas foram projetadas no programa MATLAB e as simulações foram realizadas no programa ANSYS. Nos resultados comparados entre o monopolo quadrado e a antena bioinspirada na folha elíptica, se pode observar que a antena bioinspirada medida, em comparação com o monopolo quadrado, apresentou uma redução da largura de banda de 77,27%, com estrutura mais compacta, redução de 98%, cobrindo a faixa de frequências de rede local sem fio, e comunicações móveis de 4G em 2,5 GHz. A técnica proposta utiliza um refletor no plano de terra para alterar os parâmetros da antena, com diagrama de radiação omnidirecional para direcional, mantendo as características da banda larga, largura de feixe de meia potência maior que 100º, com densidade de corrente, e ganho semelhante de uma antena direcional. A partir dos resultados medidos se pode avaliar que a antena monopolo da folha elíptica demonstrou características de banda larga com largura de banda de 500 MHz, largura de feixe de meia potência de 128 graus, ganho de 6,28 dBi, densidade de corrente de 13,01 A/m², e polarização circular.

Palavras-chave: Antena direcional monopolo, folha elíptica, proporção áurea, banda 4G.

Abstract

In this work, it is proposed the development a new monopole directional antenna, bioinspired in elliptical leaf, with cut by golden ratio, for 4G band application, by the use of the technique of the cut of the radiating element for the increasing of the antenna perimeter, being the first work to use this technique in a bioinspired antenna, promotes resonance frequency turned, and reconfiguring of the antenna parameters as bandwidth, radiation pattern and gain, with the use of the reflector near to the group plane, without the insertion of active devices as the pin diode or change in radiating element. The shape antenna is generated by Gielis formula, built in FR4 substrate, with cuts calculated by golden ratio. To compare the results of the bioinspired monopole on the elliptical sheet, a square-shaped monopole antenna was designed, simulated and measured, the structures were designed in the MATLAB software version 2015(b) and the simulations were performed in the Ansys software version 2016. In the results compared between the square monopole and the bioinspired antenna in the elliptical sheet, it can be seen that the measured bioinspired antenna, compared to the square monopole, presented a bandwidth reduction of 77.27%, a more compact structure, with a reduction of 98%, covering the wireless local area network, and long-time evolution 4G at 2.5 GHz. The proposed technique uses a reflector on the ground plane, to change the parameters of the monopole planar antenna, of omnidirectional radiation pattern to a directional, maintaining the characteristics of the broadband, half-power beamwidth great than 100º, with high current density, and similar gain of a directional antenna. From the results, it has been observed that the elliptical leaf monopole antenna shows broadband characteristics, with a half-power beamwidth of 128 degrees, wideband, the bandwidth of 500 MHz, a gain of 6.28 dBi, a current density of 13.01 A/m², and circular polarization.

Keywords: Monopole directional antenna, elliptical leaf, golden ratio, 4G band.

1. Introdução

As comunicações móveis modernas exigem pesquisas em dispositivos compactos operando em diversas tecnologias. As antenas são dispositivos importantes porque realizam a recepção e transmissão de sinais, que devem apresentar estrutura compacta, baixo custo, polarização circular e banda larga. Várias técnicas são usadas em antenas para alterar a forma e os parâmetros, incluindo tecnologias fractais e bioinspiradas [1,2,3].

Antenas bioinspiradas procuram utilizar as formas de seres vivos, com o objetivo de dimensionar dispositivos capazes de aprimorar parâmetros de resposta, e são utilizadas em diversas aplicações, como rede local sem fio, Wi-Fi, redes de sensores sem fio industriais, redes ISM (*Industrial Scientific and Medical*), comunicações móveis, em vários tipos de antenas, incluindo, patch, monopolo, abertura, etc. [1,2,3,4,5].

Uma antena monopolo planar também é caracterizada por apresentar banda ultralarga, estrutura compacta, baixo ganho, operando em várias faixas de frequência, diversas formas e diagrama de radiação omnidirecional [6,7]. Algumas técnicas foram utilizadas para alterar os parâmetros da antena monopolo, como modificações no plano de terra [8], o uso dos metamateriais [9], e a inserção do refletor na parte traseira da antena [4].

As formas dos elementos radiantes das antenas bioinspiradas podem ser geradas por diversos métodos, como desenho em software simulador e imagens geradas por equações [2,4,5,10,11]. Com o uso da tecnologia de formas bioinspiradas na antena é possível gerar estruturas compactas com maiores perímetros operando em UHF (*Ultra High Frequency*) e micro-ondas [2].

A fórmula de Gielis é uma equação polar capaz de gerar diversas formas, incluindo formas vegetais [6,10,11]. Plantas e outros organismos produzem energia por meio do processo de fotossíntese, na qual colhem luz, transformando energia eletromagnética capturada em energia química para sustentar a vida. A planta tem um complexo sistema de captação de luz, e um centro de reação [12,13]. Assim, as formas das plantas são otimizadas para a captação de luz, uma onda eletromagnética, na faixa de THz, suas formas possuem uma estrutura compacta com um perímetro maior, uma característica importante na tecnologia de antenas, pois a frequência de ressonância de uma antena está relacionada ao perímetro do elemento radiante em uma antena *patch* [4,5,6,7].

A fórmula de Gielis é uma equação polar capaz de gerar várias formas, incluindo formas de plantas [8], [9], [10]. Vários trabalhos usam a fórmula de Gielis no desenvolvimento de formas de antenas monopolo. Em [2] foi desenvolvida uma antena planar monopolo, bioinspirada em uma *Ficus Indica*, com alimentação híbrida, operando em rede local sem fio (*Wireless Local Area Network* – WLAN) e 5 GHz. Uma antena monopolo bioinspirada na planta de cana-de-açúcar para operação em 4G em 700 MHz, e ganho máximo de 7,7 dBi foi desenvolvida em [4]. Em [5] foi utilizado o formato bioinspirado de uma antena monopolo bioinspirada em folha de *Ginkgo Biloba*, construída em material têxtil e cobre laminado, abrangendo as bandas 2G, 3G e 4G, com largura de banda de 2,7 GHz. Em [6] foi utilizado o formato bioinspirado no desenvolvimento de antena com largura de banda larga de 6 GHz, gerada pela fórmula de Gielis, operando em 5,5 GHz e ganho máximo de 5 dBi. Algumas formas de antenas bioinspiradas como desenvolvidas pela fórmula de Gielis em [11,14], com dispositivos construídos em FR4 e jeans, operando em banda ultralarga, 2G, 3G, 4G e alcance WLAN. Uma antena monopolo bioinspirada na folha *Acer Macrophyllum* para monitoramento de disjuntores de 230 kV [15].

Nesta Dissertação é proposto o desenvolvimento de uma antena monopolo direcional planar, bioinspirada em uma folha elíptica, gerada pela fórmula de Gielis, com cortes de acordo com o número de ouro, operando na banda de 4G em 2,5 GHz e WLAN em 2,4 GHz, com uso de um refletor para modificação de parâmetros da antena, como largura de banda, frequência de ressonância, diagrama de radiação e ganho.

1.1.Objetivos

1.1.1.Objetivo Geral

Desenvolvimento de uma antena monopolo direcional planar bioinspirada em uma folha elíptica, gerada pela fórmula de Gielis, com cortes de acordo com o número de ouro para aplicação na banda WLAN e 4G.

1.1.2.Objetivos Específicos

Para obtenção do objetivo geral são delineados os seguintes objetivos específicos:

- Realizar o levantamento bibliográfico sobre o uso da engenharia bioinspirada no desenvolvimento de antenas do tipo monopolo planar;
- Investigar o uso da fórmula de Gielis para a geração da forma bioinspirada da folha elíptica;
- Projetar, simular e medir a antena protótipo;

1.2.Problema e justificativa

1.2.1.Descrição do Problema

As antenas são dispositivos eletromagnéticos que possuem dimensões projetadas como frações do comprimento de onda na frequência de ressonância. O comprimento de onda é diretamente proporcional ao perímetro da estrutura eletromagnética e inversamente proporcional a frequência de ressonância, assim, antenas que operam em frequências baixas possuem maiores dimensões. O desafio é o desenvolvimento de estruturas compactas que operem em frequências baixas, algumas soluções observadas nas referências bibliográficas especializadas indicam o uso de técnicas especiais, como a aplicação de tipos diferentes de antenas e o aumento do perímetro total por meio de formas não euclidianas como os fractais e as formas bioinspiradas.

1.2.1.Justificativa

Diversas técnicas são utilizadas na tecnologia de antenas para o aumento do perímetro físico e elétrico das estruturas, dentre elas podem ser destacadas o uso das geometrias fractais e pré-fractais, os quais utilizam a variação da dimensionalidade para alteração do perímetro das

estruturas, podendo ser utilizadas no desenvolvimento de estruturas compactas, e das formas de seres vivos observados na natureza as quais usam ondas eletromagnéticas para geração de energia, como as plantas e alguns seres microbióticos. As plantas são seres que utilizam parte do espectro eletromagnético para produção de energia, para isto elas possuem um centro complexo de captação de energia, possuindo formas otimizadas para captação de ondas, podendo ser compreendidas de forma análoga a antenas receptoras para faixa de THz. Assim, o uso da forma das plantas pode proporcionar o desenvolvimento de estruturas eletromagnéticas compactas com perímetros ampliados, podendo ressoar em frequências mais baixas.

1.3.Organização do projeto

Esta Dissertação é composta por mais cinco Capítulos além desta Introdução. No Capítulo 2 é apresentada a metodologia aplicada. No Capítulo 3 é abordada a Fundamentação Teórica utilizada no desenvolvido do trabalho. No Capítulo 4 são apresentados os principais aspectos e conceitos relacionados à tecnologia 4G utilizada no Brasil e WLAN. No Capítulo 5 são discutidos os resultados do projeto da antena, e no Capítulo 6 as Considerações Finais.

2. Metodologia

Nesta Dissertação propõe-se o desenvolvimento de uma antena monopolo direcional, bioinspirada na folha elíptica, gerada pela fórmula Gielis, com corte no elemento radiante de acordo com a proporção áurea, operando nas bandas WLAN (2,4 GHz a 2,483 GHz) e LTE 4G (2,5 GHz a 2,6 GHz).

A organização deste trabalho pode ser dividida em duas partes, a pesquisa bibliográfica especializada, desenvolvimento do projeto de uma antena monopolo planar bioinspirada, gerada pela fórmula de Gielis com cortes de acordo com o número de ouro.

A pesquisa bibliográfica foi realizada em anais de congressos especializados, portais de periódicos, como o IEEE *xplore*, *Science Direct*, MDPI, Google Acadêmico, *Springer*, *Hindawi*.

A metodologia para o desenvolvimento de antenas bioinspiradas utilizada neste trabalho é adaptada de [6], com escolha das aplicações de frequências para comunicações móveis na banda 4G, 2,5 GHz – 2,6 GHz, construídas em material dielétrico de fibra de vidro (FR4), permissividade relativa de ε_r = 4,4, tangente de perda de tan(δ) = 0,02, espessura de 1,55 mm utilizando forma de folha elíptica, gerada pela versão MATLAB 2015, simulada pela versão de software ANSYS 2016, e realizada no Laboratório de Medições do Instituto Federal da Paraíba (IFPB), Campus de João Pessoa utilizando um Analisador de Rede Vetorial (VNA) do modelo Agilent S5071C (300 kHz-20 GHz).

Nesta Dissertação projetou-se uma antena monopolo, bioinspirada em uma folha elíptica, na qual algumas técnicas são aplicadas. O primeiro é o uso de cortes no elemento radiante, a fim de aumentar o perímetro da antena, algo semelhante ao que é feito em antenas com formas fractais, como o fractal Koch, que pode ser positivo, com o aumento da estrutura total, ou pela remoção de partes do elemento radiador, gerando estruturas semelhantes. As partes retiradas do elemento radiante são semelhantes à estrutura original com tamanho reduzido, em que o número de ouro foi utilizado para o cálculo, por ser um fator conhecido e aplicado em diversas tecnologias, o que se mostrou eficaz para o aumento do perímetro e

consequente redução da frequência de ressonância da antena. A segunda técnica foi o uso de um refletor próximo ao plano de terra da antena, com o qual foi possível alterar a largura de banda e o ganho da antena, mantendo a largura de feixe de meia potência e a densidade de corrente constante, com polarização circular. Assim, foi possível reconfigurar a resposta da antena não inserindo nenhum outro dispositivo na antena, como um diodo pin, linhas de transmissão, aberturas internas ou qualquer outra técnica.

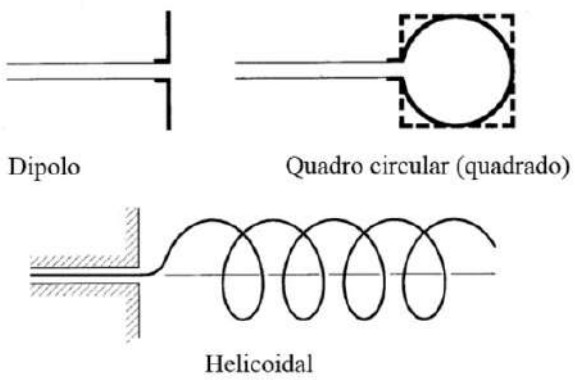
3. Fundamentação Teórica

Uma antena é um componente indispensável para as telecomunicações. O IEEE a define como “um dispositivo para a radiação ou recepção de ondas de rádio” [16], podendo ser caracterizada como uma estrutura de conexão entre dois pontos por meio de espaço livre. O objetivo é transportar ondas eletromagnéticas da fonte de transmissão à antena do receptor. Devido ao uso de diversas tecnologias diferentes, como redes locais sem fio, redes de uso junto ao corpo, comunicação via satélite, comunicações móveis, sistemas de transmissão e recepção de sinais de TV e rádio, etc., a pesquisa em antenas tem utilizado materiais e formas geométricas diferentes para alteração dos parâmetros das antenas [17]. A seguir são abordados os principais conceitos relacionados ao tema.

Segundo [16], antenas são dispositivos utilizados em sistemas de comunicação sem fio, que tem como objetivo transformar ondas guiadas em ondas radiais, podendo ser de diversos tipos:

Antenas filamentares, são antenas formadas por um ou mais fios, podendo ser encontradas em sistemas de comunicação portáteis, automóveis, navios, aviões, etc. e assumindo diversas formas como pode ser observado na Figura 1.

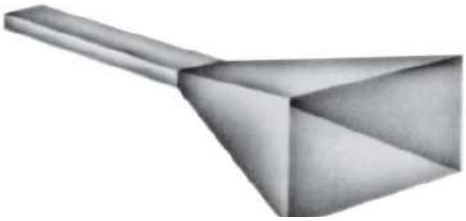
Figura 3.1 – Ilustração de antenas filamentares.



Fonte: Balanis (2016)

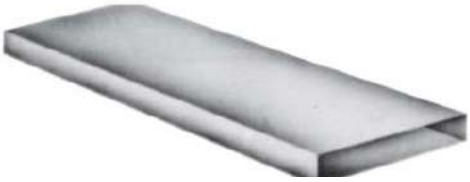
Antenas de abertura, formadas por tubos com geometria quadrada, circular, retangular, etc. podendo ser cobertas por materiais dielétricos para serem protegidas de condições com aplicações espaciais e aeronáuticas;

Figura 3.2 – Ilustração de antenas de abertura.



Corneta Piramidal

Corneta Cônica

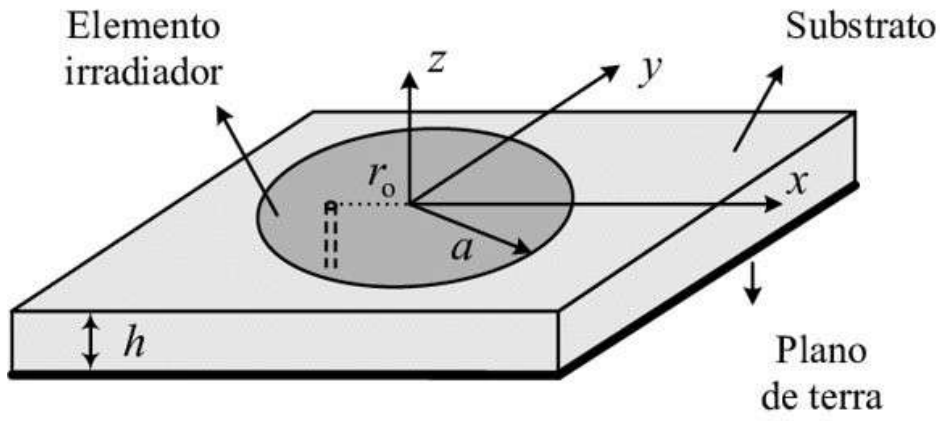


Guia de Onda Retangular

Fonte: Balanis (2016)

Antena de microfita, teve seu uso popularizado na década de 1970, são utilizadas em diversas aplicações e sistemas comerciais. Essa antena é caracterizada por um elemento radiante (*patch*) e um plano de terra metálico separados por um substrato dielétrico, onde o *patch* e plano de terra podem assumir diversas formas [18]. As antenas de microfita possuem fácil fabricação, adaptáveis a superfícies planas ou curvas, de baixo custo e muito versáteis quanto a frequência de ressonância, polarização, diagrama de radiação e impedância.

Figura 3.3 – Ilustração de antenas de microfita.



Fonte: Balanis (2016)

3.1. Parâmetros Fundamentais

Para descrever o desempenho de uma antena, são necessárias definições de vários parâmetros, podendo ser destacados o diagrama de radiação, a diretividade, ganho, largura de banda e a polarização. A seguir são apresentados os conceitos de cada parâmetro.

3.1.1. Diagrama de Radiação

O diagrama de radiação de uma antena é a representação gráfica das propriedades de radiação da antena em função de coordenadas espaciais. Na maioria dos casos é determinado na região de campo distante e é representado em função das coordenadas direcionais [19]. A região de campo distante, ou região de Fraunhofer, "é definida como a região de campo de uma antena onde a distribuição angular dos campos independe da distância da antena". Uma antena de dimensão D, a região de campo distante pode ser obtida para distâncias superiores a $2D^2/\lambda_0$, onde λ_0 é o comprimento de onda ($\lambda_0=c/f_r$, sendo c a velocidade da luz no vácuo aproximadamente 3.10^8 m/s e f_r a frequência de ressonância da antena). As propriedades de radiação incluem densidade de potência, intensidade de radiação, diretividade, fase ou polarização [16].

O diagrama da antena pode ser compreendido como um diagrama bidimensional utilizando coordenadas polares, e em três dimensões, com coordenadas esféricas, em que é representada a magnitude do campo magnético e elétrico em função do espaço angular em três escalas: linear, chamado de diagrama de campo; o diagrama de potência representa o quadrado da magnitude do campo elétrico ou magnético; e em escala logarítmica, em que o diagrama de

potência é apresentado em decibel (dB), plotado a uma distância constante ou a um raio (*r*) [16]. O diagrama de potência em coordenadas esféricas, de raio, *r*, e de ângulo θ e φ é definido por:

$P(\theta, \varphi) = P_r(r, \theta, \varphi)r^2$ = densidade de potência por unidade de ângulo sólido (W/m^2). (1)

A quantidade usada para descrever a potência associada a uma onda eletromagnética é o vetor *Poynting* definido por:

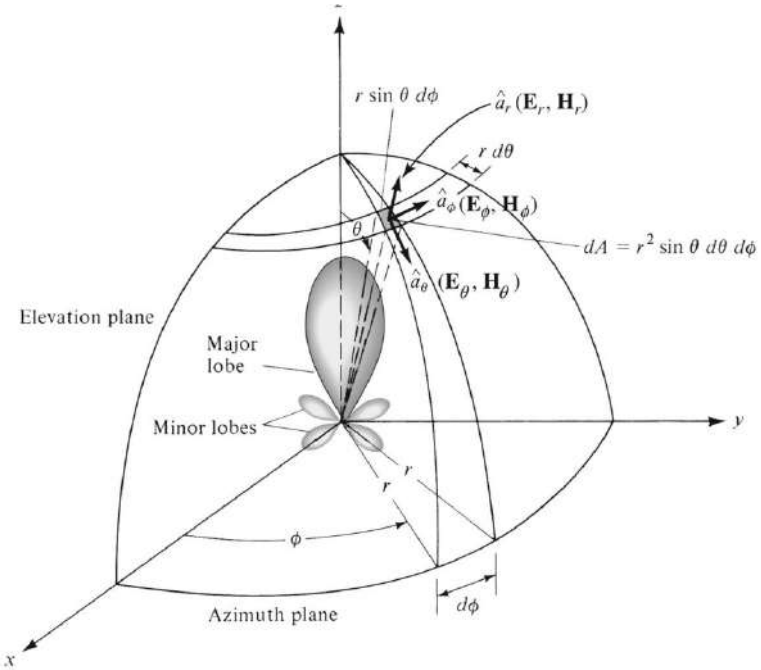
$$P_r(r, \theta, \varphi) = \frac{1}{2} Real[\mathrm{ExH}^*] = \frac{1}{2\eta_0} |\mathrm{E}|^2, \quad (2)$$

em que E é a intensidade de campo elétrico (V/m), H é a intensidade de campo magnético (A/m), transversal a direção de propagação da onda na direção radial (*r*), $\eta_0 = \sqrt{\mu_0/\varepsilon_0}$ é a impedância da onda no espaço livre, em que μ_0 e ε_0 são a permeabilidade e a permissividade do espaço livre [20]. Geralmente o diagrama de potência é normalizado para uma potência máxima de valor $P_{máx}$, conforme,

$$P_n(\theta, \varphi) = \frac{P_n(\theta, \varphi)}{P_{máx}}. \quad (3)$$

Um conjunto de coordenadas conveniente é mostrado na figura 3.4.

Figura 3.4 – Sistema de coordenadas de uma Antena.



Fonte: Balanis (2016)

A radiação de uma antena não se distribui de forma isotrópica, ou seja, não radia igualmente em todas as direções, a maior intensidade de radiação depende da direção

considerada (θ, φ). Pode-se classificar as antenas quanto às suas radiações ou quanto à "forma" de seus diagramas de radiação. Deste modo, são apresentados tipos de diagramas de radiação.

Radiação isotrópica é o diagrama de uma antena hipotética que radia igualmente em todas as direções, sem perdas, considerada uma antena ideal. No entanto, fisicamente este tipo de antena não existe, normalmente serve como referência em estudos de outras antenas [16,17]. Por radiar igualmente em todas as direções o diagrama de radiação de uma antena isotrópica tem formato circular em 2D ou uma esfera em 3D. Radiação direcional é o diagrama que focaliza a energia de radiofrequência em uma determinada direção, ou seja, tem a propriedade de radiar com mais eficiência em uma determinada direção que em outras. Radiação omnidirecional é o diagrama de antenas que possui um diagrama direcional em uma direção e um não-direcional em um plano ortogonal [21].

Figura 3.5 – Diagrama de radiação Isotrópica.

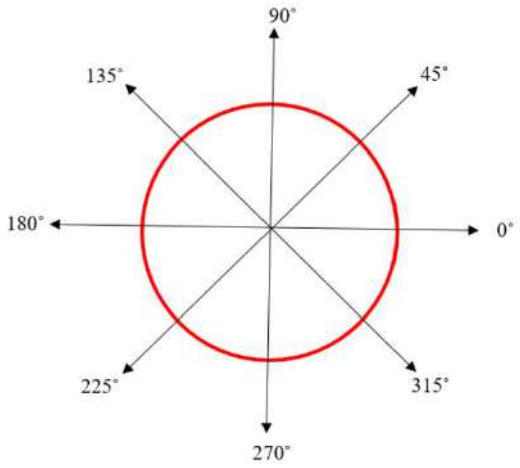


Figura 3.6 – Diagrama de radiação Direcional.

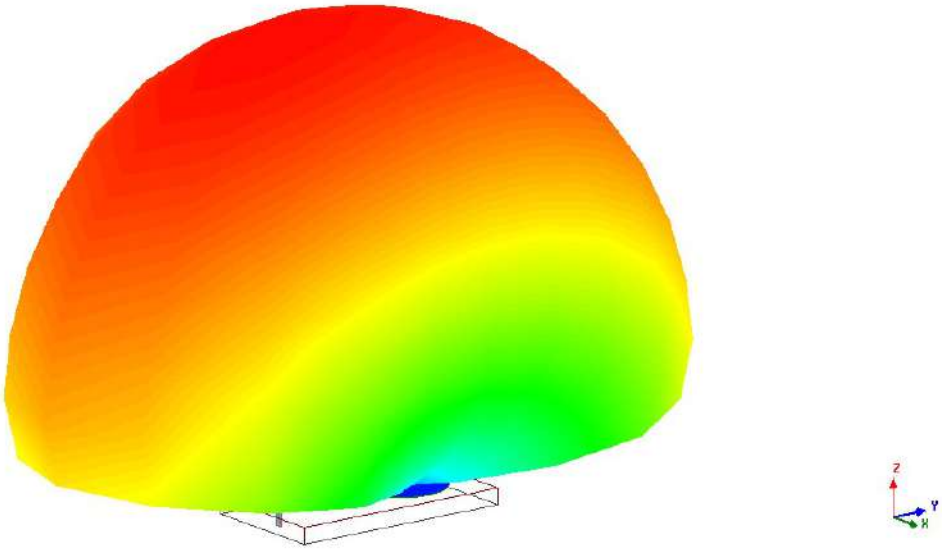
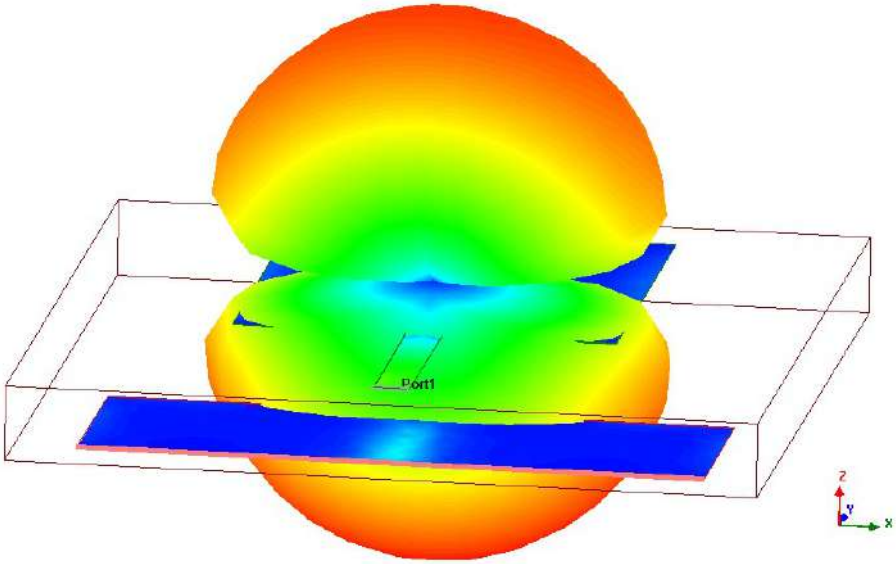


Figura 3.7 – Diagrama de radiação Omnidirecional.



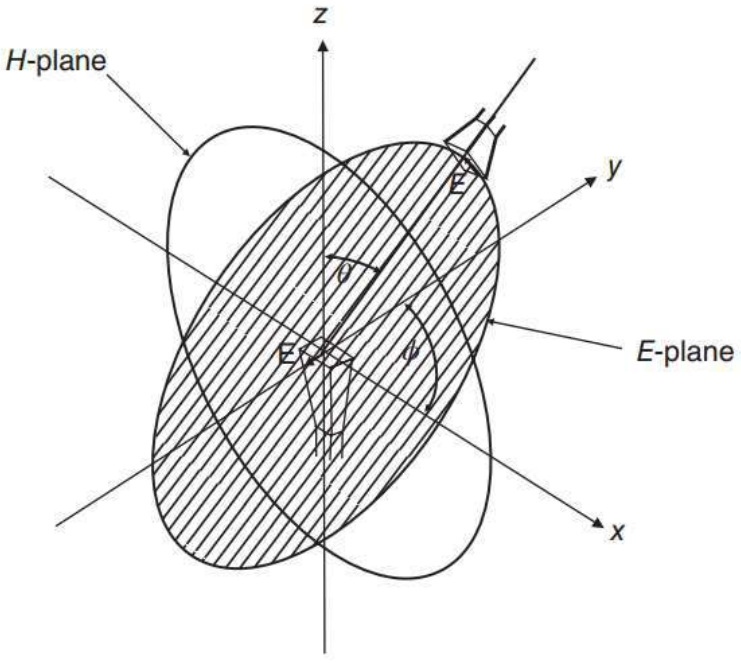
Fonte: Autor (2022)

3.1.2. Polarização

A polarização de uma antena em uma direção é definida como a polarização de onda radiada pela antena, quando identificada a direção, é indicada pela direção de máxima potência da antena. A polarização da energia radiada varia com a direção do centro da antena, de modo que partes do diagrama podem ter polarizações diferentes das outras. Podendo ser compreendida como a propriedade que descreve a direção e amplitude de uma onda eletromagnética, variante no tempo, do vetor de campo elétrico [20]. No campo distante os campos radiados são tangenciais à superfície de uma esfera que tem como centro uma antena isotrópica, ou seja, com mesma potência para todos os lados, e omnidirecional, que radia para todos os lados. No geral o campo sobre a esfera tem componentes nas direções θ e φ, para o caso dos componentes E_θ e E_φ estarem em fase, ou quando a diferença de fase é de 0º ou 180º, são consideradas linearmente polarizadas, se estiverem defasadas em ±90º elas têm polarização circular e com polarização elíptica caso a diferença de fase seja arbitrária [16].

As medições do diagrama são realizadas em dois principais planos de antenas linearmente polarizadas, conhecidas como plano-E e plano-H, em que o plano-E é o corte paralelo ao campo elétrico e o plano-H, o corte perpendicular ao campo elétrico, como pode ser observado na Figura 3.8.

Figura 3.8 – Identificação do Plano-E e Plano-H de duas antenas cornetas.



Os componentes de campo elétrico E_θ e E_φ no campo distante, em função do tempo, t, são observados na Figura 3.9. Na Figura a origem, O, é uma antena com radiação indicada pelo vetor unitário, u_r, na direção de propagação da onda. Os estados de polarização elíptica, circular e linear em função do tempo, t, são apresentados na Figura 3.10.

Figura 3.9 – Componentes do campo elétrico em função do tempo

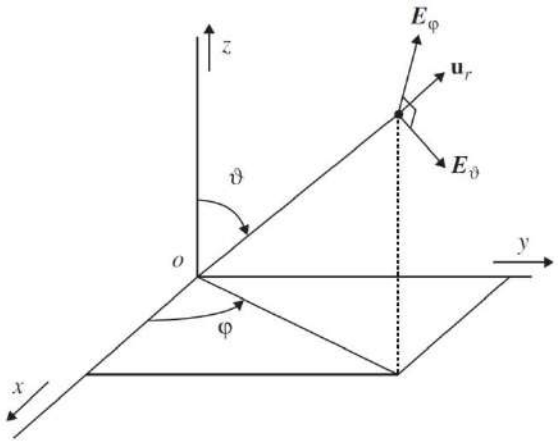
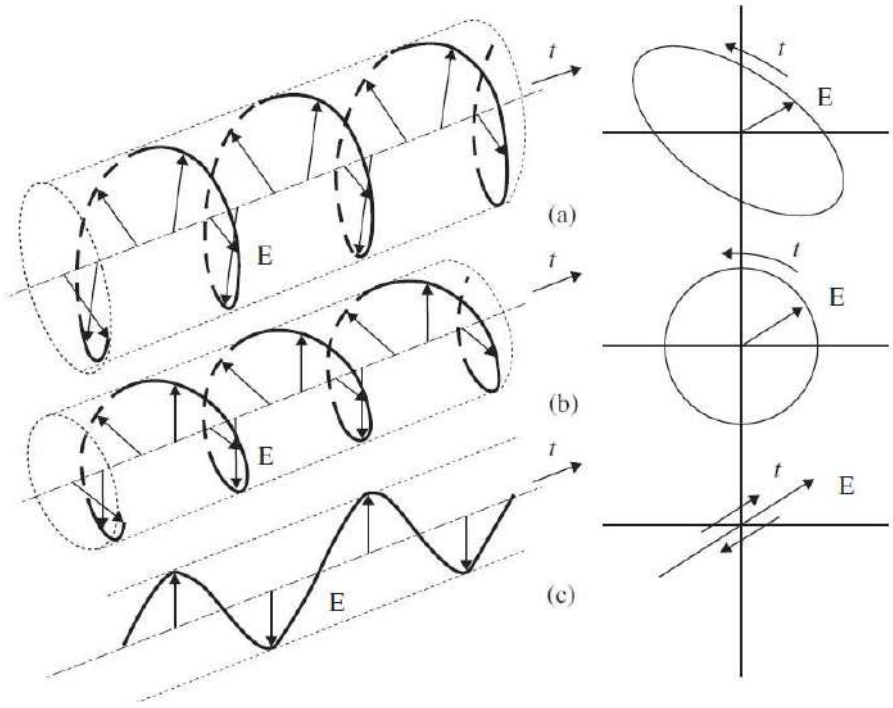


Figura 3.10 – Estados de polarização: a) elíptica, b) circular, c) linear



A razão axial de uma antena é definida como a razão entre o eixo maior e menor de um padrão de antena polarizado circularmente. Se uma antena tiver polarização circular perfeita, essa proporção seria 1 (0 dB). Uma antena com polarização circular, é composta por duas componentes ortogonais de campo elétrico de igual amplitude e 90 graus defasadas, quanto mais próxima a relação axial estiver de 0 dB, melhor.

3.1.3.Diretividade e Ganho

A diretividade de uma antena descreve quão bem um elemento radiante direciona energia em uma dada direção. Em outras palavras, a diretividade é a medida da direção do lóbulo principal do diagrama de radiação e indica a capacidade de radiação de uma antena em determinada direção. A diretividade também pode ser entendida como a razão entre a intensidade de radiação em uma dada direção da antena e a intensidade de radiação média. A intensidade de radiação média é igual a potência total radiada pela antena dividida por 4π [22].

$$D = \frac{U}{U_0} = \frac{4\pi U}{P_r} \tag{4}$$

onde D é a diretividade, U é a intensidade de radiação e P_r é o total de potência radiada. A diretividade, D, é a qualidade relativa do ganho e sempre é superior a 1, $D \geq 1$.

O máximo ganho de uma antena é o valor utilizado para descrever a desempenho de uma antena, outro termo utilizado é o ganho de máxima potência. O ganho tem relação direta com a potência de entrada da antena, ou a potência fornecida por um gerador à antena, medida em decibel. Para uma antena dipolo curto, o radiador isotrópico é de 3/2 ou 1,76 dBi, com o dBi indicando o ganho em decibel sobre um radiador isotrópico [22]

3.1.4.Impedância e Largura de Banda

Além das características de radiação, no desenvolvimento de antenas, devem ser consideradas as características de impedâncias. A impedância da antena é uma variável complexa Z_A.

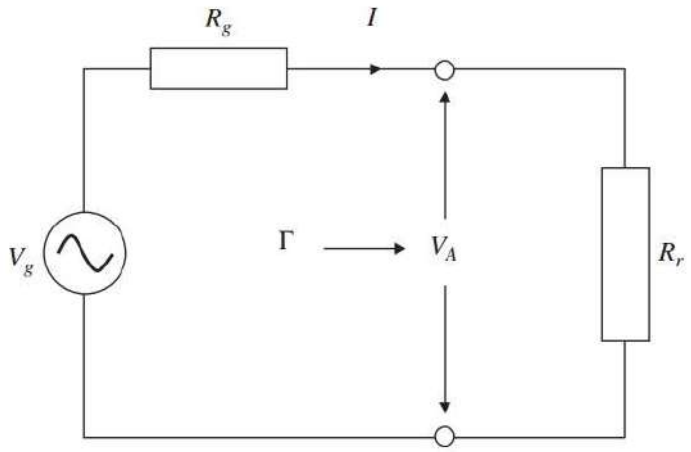
$$Z_A = R_A + jX_A, \tag{5}$$

em que R_A é a parte real ou resistiva, e X_A a parte imaginária (complexa) ou reativa da impedância da antena, com $j = \sqrt{-1}$. A parte real é composta por duas componentes, a perda ôhmica, R_L, e a perda de radiação, R_r, ou resistência de radiação da antena.

$$R_A = R_L + R_r. \tag{6}$$

Na Figura 3.11 é apresentado o circuito equivalente das perdas de uma antena, conectado a um gerador, V_g, com impedância real, R_g, e a perda reativa e ôhmica é indicada em $R_r = Z_A$, e uma corrente I.

Figura 3.11 – Circuito equivalente das perdas de uma antena com um gerador.



A potência do gerador, P, entregue a antena é dada por:

$$P = \frac{1}{2} R[V_A \,.\, I^*], \tag{7}$$

em que R$\{x\}$ é a parte real do número x e I^* é o complexo conjugado de I.

Considerando que a antena recebera apenas a parte real, a potência recebida pela antena é indicada como

$$P = \frac{1}{2} |V_g|^2 \left| \frac{R_g}{R_g + R_r} \right|^2 \frac{1}{R_r}, \tag{8}$$

com

$$V_A = \frac{R_g}{R_g + R_r} V_g, \tag{9}$$

e

$$I^* = I = \frac{V_A}{R_r}. \tag{10}$$

O valor de impedância que resulta na máxima potência transferida do gerador à antena, pode ser encontrado por:

$$\frac{\partial P}{\partial R_r} = 0. \tag{11}$$

Substituindo (10) em (8), encontra-se que, a condição de máxima transferência de potência para antena é encontrada, quando a impedância do gerador é igual a impedância da antena, ou,

$$R_r = R_g. \tag{12}$$

Nesta condição não há potência refletida da antena para o gerador, assim o coeficiente de reflexão (Γ) é zero

$$\Gamma = \frac{R_r - R_g}{R_r + R_g}. \tag{13}$$

A partir do coeficiente de reflexão é possível calcular o coeficiente de tensão de onda estacionária (*Voltage Standing Wave Ratio* – VSWR). Caso o elemento radiante não apresente a mesma impedância da excitação, a potência cedida não será totalmente absorvida pelo elemento radiante e o restante da potência será refletido para o transmissor, gerando uma onda estacionária. Para avaliação do parâmetro da antena, o critério geralmente adotado é o valor do VSWR ≤ 2, o que caracteriza a largura de banda e garante que pelo menos 90% da potência de entrega será radiada [16]. O VSWR é dado por:

$$\text{VSWR} = \frac{1 + \Gamma}{1 - \Gamma}. \tag{14}$$

A impedância de uma antena, geralmente varia em função da frequência, e o casamento entre as impedâncias do gerador e da antena, também variam em função da frequência. Assim a antena operará eficientemente em banda restrita de frequência, a qual é chamada de largura de banda da antena. A frequência específica de melhor casamento das impedâncias apresenta maior perda de retorno, ou de menor coeficiente de reflexão, e é chamada de frequência de ressonância (f_0). A largura de banda é determinada pelas frequências mais baixas e mais altas, em que a degradação do casamento de impedâncias vai até o nível onde, o casamento de impedâncias é considerado como inaceitável para transmissão/recepção de um sinal [23].

Os níveis mais baixos e mais altos determinam os contornos da banda de frequências de transmissão/recepção de uma antena, ou a largura de banda da antena. Os níveis do coeficiente de reflexão para a determinação da largura de banda de uma antena, geralmente, são indicados em -10 dB, com $\Gamma_2 \leq 0{,}1$ ou -15 dB, com $\Gamma_2 \leq 0{,}03$, dependendo da aplicação. De forma genérica a largura de banda (*Bandwidth* – BW), ou banda passante da perda de retorno (*Return Loss* – RL), em função da frequência, de uma antena é dada pela diferença entre a frequência mais alta, f_2, e a frequência mais baixa, f_1, em -10 dB.

$$\mathrm{BW} = f_2 - f_1 \,. \tag{15}$$

Para antenas de pequena largura de banda, ou banda estreita, a largura de banda é expressa como porcentagem da frequência central, f_r, chamada de largura de banda fracionária, indicado por:

$$\mathrm{BW}_{\%} = \frac{f_2 - f_1}{f_r} \,.100\% \,. \tag{16}$$

Com o parâmetro de perda de retorno é possível medir o casamento de impedância de uma antena, o qual pode ser escrito em função do VSWR (dB), definido por:

$$\mathrm{RL(dB)} = 20 \log\left(\frac{VSWR+1}{VSWR-1}\right) \tag{17}$$

Escrevendo (16) em função do módulo do coeficiente de reflexão (|Γ|), tem-se:

$$\mathrm{RL(dB)} = -20\log(|\Gamma|). \tag{18}$$

3.2.Antenas Monopolo Planar Direcional

Uma antena monopolo planar é caracterizada por ter um elemento condutor separado de um plano de terra truncado por um dielétrico. Este tipo de antena tem como característica banda ultra larga, diagrama de radiação omnidirecional, pequena dimensão e largura de feixe de meia potência maior que 60º, geralmente utilizado em aplicações de curta distância abrangendo diversas faixas de frequências [24].

As dimensões de uma antena monopolo planar estão diretamente relacionadas com o perímetro da antena, pois a distribuição de corrente no elemento radiante é mais concentrada nas bordas do que no centro [24], assim, a frequência de ressonância é dada pelo caminho percorrido pela onda na estrutura do elemento radiante, portanto, aumentar o perímetro, em uma área menor, promoveria baixo impacto nos parâmetros originais da antena, podendo ser projetadas estruturas compactas operando em frequências mais baixas. O perímetro da antena pode ser definido por:

$$p = \frac{c}{f_0\sqrt{\frac{\varepsilon_r+1}{2}}}, \tag{19}$$

em que, c é a velocidade da luz no vácuo, f_0 é a frequência da primeira ressonância em -10 dB, e ε_r é a permissividade relativa do ar.

3.3.Antenas Bioinspiradas

As antenas bioinspiradas utilizam as formas de seres vivos, pois nelas se pode observar funções análogas às encontradas nas antenas, como recepção/transmissão de sinais e ondas eletromagnéticas. A pesquisa pode ser dividida em antenas bioinspirada em animais e em plantas. O objetivo é usar as formas naturais para otimizar os parâmetros das antenas.

Em [25] foi projetada uma antena com a forma de uma tulipa operando na faixa UWB, com abertura no elemento radiante para operação em 5 GHz. Em [26] foi desenvolvida uma metodologia para o desenvolvimento de um monopolo bioinspirado em folha do acero canadense operando na faixa UWB (3 – 14 GHz), com abertura no elemento radiante para a faixa WLAN em 5 GHz (5 - 6 GHz).

Uma proposta para o desenvolvimento de antenas bioinspiradas é o uso da fórmula de Gielis. Diversos trabalhos utilizaram a fórmula de Gielis no projeto de antenas monopolo [8], [9], [10]. Uma antena planar monopolo, bioinspirada em uma *Ficus Indica*, com alimentação híbrida, operando em rede local sem fio (WLAN) a 5 GHz foi desenvolvida em [2]. Uma antena monopolo direcional bioinspirada na planta de cana-de-açúcar operando na faixa de 700 MHz desenvolvida em [4]. Em [5] foi utilizada uma antena monopolo bioinspirada em folha de *Ginkgo Biloba*, construída em material têxtil e cobre laminado, abrangendo as bandas 2G, 3G e 4G, com largura de banda de 2,7 GHz. Um formato bioinspirado foi utilizado no desenvolvimento de antena com largura de banda larga de 6 GHz [6], gerada pela fórmula de Gielis, operando em 5,5 GHz e ganho máximo de 5 dBi. Algumas formas de antenas bioinspiradas como desenvolvidas pela fórmula de Gielis em [11,14], com dispositivos construídos em FR4 e denim, operando em banda ultralarga, 2G, 3G, 4G e WLAN.

3.3.1.Fórmula de Gielis

A fórmula de Gielis é uma expressão polar que, semelhante aos fractais e à série de Fibonacci, procura representar as formas observadas na natureza, a partir de expressões matemáticas. A partir da variação dos parâmetros da expressão de Gielis pode-se desenvolver grande variedade de formas que se assemelham às formas de animais e plantas.

Segundo Gielis [6] as formas dos círculos, elipses e retângulos são membros do grupo das superelípses, definidas pela expressão:

$$\left|\frac{x}{a}\right|^n + \left|\frac{y}{b}\right|^n = 1, \tag{20}$$

as quais possuem a simetria limitada.

Para superar a limitação da simetria limitada, Gielis propõe o uso da coordenada polar, $r = f(\theta)$, pela substituição $x = rcos(\theta)$ e $y = rsen(\theta)$, e a introdução do argumento $m/4$ do ângulo θ que proporciona simetria rotacional específica, assim, é proposta uma expressão polar para $r(\theta)$, em que m e n pertencem ao conjunto dos números Reais positivos, os

parâmetros a e b são números Reais positivos e diferentes de zero, com a expressão de Gielis definida por [6]:

$$r(\theta) = \frac{1}{\left\{\left[\left(\left|\frac{1}{a}\cos\left(\theta\frac{m}{4}\right)\right|\right)^{n_2} + \left(\left|\frac{1}{b}\text{sen}\left(\theta\frac{m}{4}\right)\right|\right)^{n_3}\right]^{\frac{1}{n_1}}\right\}} \tag{21}$$

A expressão (20), é denominada de superfórmula, pode ser associada a outras funções, possibilitando a geração de uma gama significativa de formas, das quais são nominadas por supercírculos, superelípses e superquadráticos. Esta expressão polar pode ser combinada com outras funções, $f(\theta)$, formando uma equação genérica, com a qual é possível gerar uma larga classe de super e sub formas, incluindo super e sub círculos [6], com a forma genérica dada por:

$$r = f(\theta)\frac{1}{\sqrt[n_1]{\left(\left|\frac{1}{a}\cos\left(\theta\frac{m}{4}\right)\right|\right)^{n_2} + \left(\left|\frac{1}{b}\text{sen}\left(\theta\frac{m}{4}\right)\right|\right)^{n_3}}} \tag{22}$$

O procedimento metodológico utilizado no projeto de antenas bioinspiradas em plantas está dividido em 11 etapas:

1 – Escolha da tecnologia em que será utilizada a antena;

2 – Identificação das frequências de operação;

3 – Escolha do tipo de antena adequada à aplicação escolhida, com banda larga, banda estreita, polarização circular, cruzada, entre outros;

4 – Seleção do material condutor e do dielétrico a ser utilizado;

5 – Caracterização das propriedades dos materiais, utilizando os dados técnicos informados pelos fabricantes ou com uso de algum método de caracterização disponível;

6 – A partir das informações levantadas, projetar uma antena com geometria euclidiana, geralmente, uma antena com geometria quadrada, retangular ou circular, com o objetivo de obter perímetro total da estrutura;

7 – Escolha da forma bioinspirada em folhas elípticas que apresentem perímetro total mais próximo da antena com geometria euclidiana;

8 – Geração da imagem pela expressão de Gielis, com o uso de técnicas de computação assistida por computador (*computer aided designer* – CAD) na geração das imagens das

antenas em formato DXF (*Drawing Exchange Format*) para importação em um programa de simulação de onda completa;

9 – Importação da imagem para um programa de simulação de onda completa;

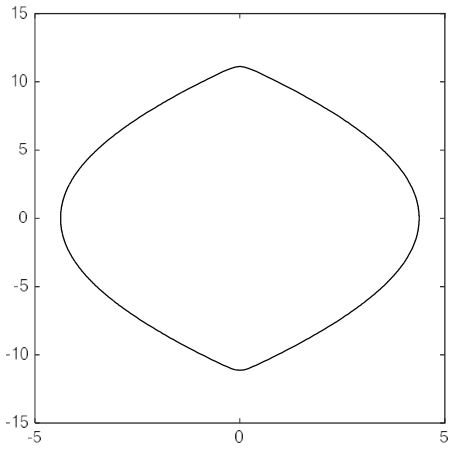
10 – Simulação e otimização da antena, com ajustes para frequência de ressonância desejada, procedimento semelhante ao realizado em antenas com a geometria euclidiana;

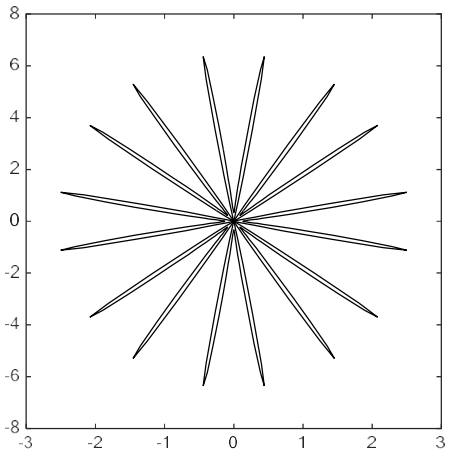
11 – Construção da antena bioinspirada, que deve levar em consideração o tipo de material utilizado e a tecnologia disponível;

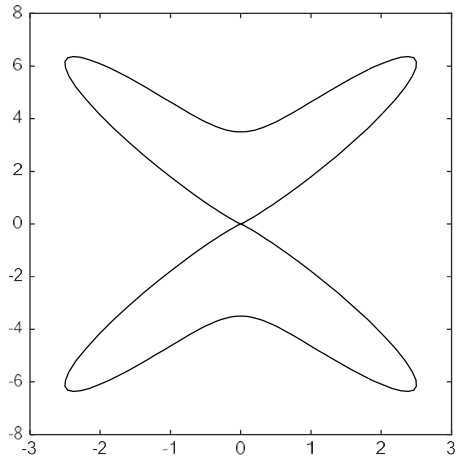
Na tabela 1 parâmetros podem ser observadas algumas formas geradas pela expressão de Gielis com seus respectivos parâmetros.

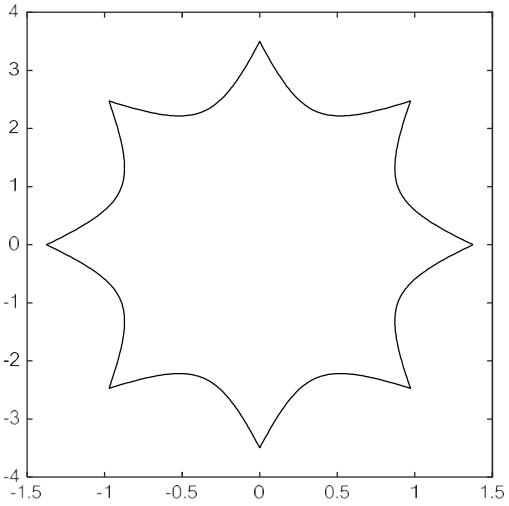
Tabela 1: Imagens geradas pela expressão de Gielis com os parâmetros utilizados.

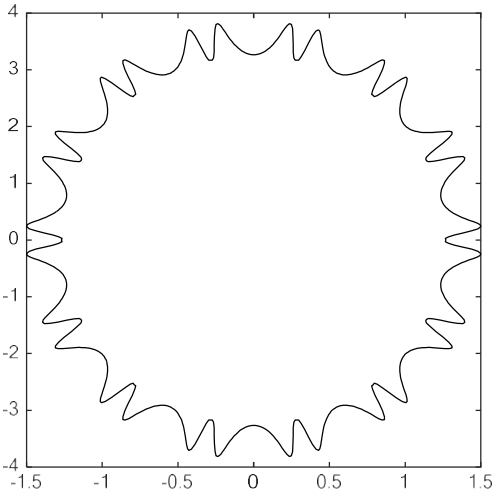
Formas de Gielis	Parâmetros

	m=2;
	n1=400;
	n2=1200;
	n3=1200;
	a=1; b=1;
	A=13.9;
	H=360;

	m=16;
	n1=0.5;
	n2=6.5;
	n3=17;
	a=2;
	b=1;
	A=20;
	H=360;

	m=4;
	n1=0.5;
	n2=6.5;
	n3=17;
	a=2;
	b=2;
	A=20;
	H=360;

	m=8;
	n1=1;
	n2=1;
	n3=1;
	a=1;
	b=1;
	A=11;
	H=360;

	m=28;
	n1=4;
	n2=25;
	n3=1;
	a=1;
	b=1;
	A=12;
	H=360;

Fonte: Autor (2022)

A partir da expressão de Gielis é possível desenvolver imagens inspiradas na natureza de forma automática, reduzindo os erros decorrentes da reprodução das formas utilizadas.

3.3.2.Forma das Plantas

As formas das plantas representam uma possibilidade de pesquisa em antenas. As plantas captam a energia luminosa, ondas eletromagnéticas, e, pelo processo de fotossíntese, transformam em energia química, atuando de forma análoga às antenas receptoras. No processo de fotossíntese as plantas utilizam água, dióxido de carbono e luz, tendo como produtos finais carboidratos, água e oxigênio (O2), gerando energia química para sua sobrevivência [27].

O sistema de fotossíntese das plantas pode ser dividido em duas partes: um centro complexo de captação e um centro de reação [28]. Os centros de captação são compostos por arranjos de antenas com características específicas de absorção de luz, que ao receberem a luz passam para um estado energético maior, e ao retornarem para o estado original liberam energia, que pode seguir três caminhos: liberação de luz e calor simultaneamente; a liberação de calor; e a transferência de energia por ressonância para o centro de reação, resultando no processo fotoquímico [29,30].

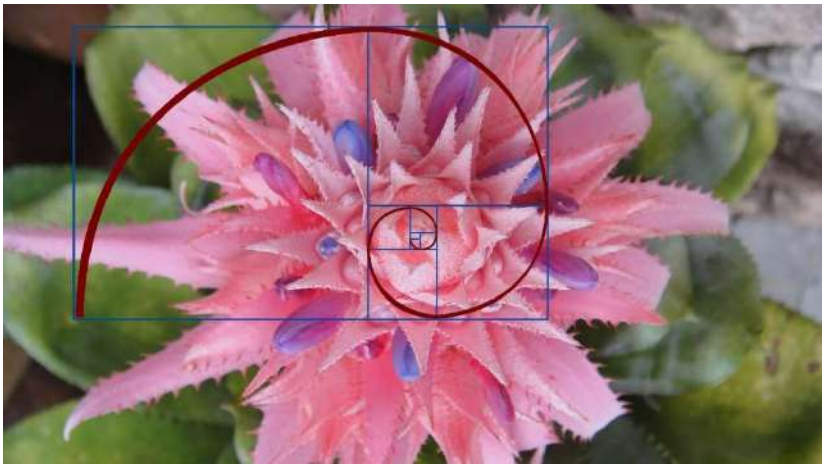
As plantas apresentam diferentes estruturas, mas possuem alguns aspectos comuns à todas: raízes, caule, folhas e frutos. Cada parte possui características especiais que variam de acordo com cada espécie. As folhas possuem ligação direta com o caule, com a estrutura dividida em três partes: o ápice, que é a parte superior, a margem, ou bordas, e a base [31].

As geometrias das plantas, com suas devidas adequações podem torna-se uma fonte interessante de pesquisa para uso em antenas pelo baixo impacto visual, principalmente em aplicações junto ao corpo.

3.4.Proporção Áurea e o Número de Ouro (Φ)

O matemático Leonardo de Pisa $(1175 - 1250)$, conhecido como Fibonacci, identificou o crescimento da população de coelhos através de uma sequência, onde a soma de dois números anteriores resulta no próximo valor dessa sequência. A partir desse estudo, Fibonacci percebeu que dividindo um número pelo anterior obtêm-se resultados que convergem para esse número de ouro, 1,618... [32].

O número de ouro (Φ), não só representa uma constante de crescimento de cada ninhada de coelhos, como também é uma constante universal de crescimento e evolução da natureza, podendo ser encontrada em diversos lugares, como por exemplo na disposição das folhas em plantas, dos galhos nas árvores, conchas, esculturas, obras de arte, entres outros.



Fonte: Planeta Biologia (2022)

O número de ouro (Φ) pode ser obtido a partir da sequência de Fibonacci. Esta sequência possui um fator interessante, se forem utilizados os divisores de cada termo pelo seu antecessor, obtemos outra sequência numérica cujo termo geral é dado por:

$$U(n) = \frac{F(n+1)}{F(n)} \tag{23}$$

Podendo ser obtida a sequência: 1÷1=1; 2÷1=2; 3÷2=1,5; 5÷3=1,66...; 8÷5=1,6; 13÷8=1,625; 21÷13=1,615; 34÷21=1,619.... Desta forma as razões vão se aproximando do número de ouro quando n tende a infinito, onde o limite é exatamente Φ [33].

Para o caso das plantas, pode-se observar na Figura (3.12), o número de ouro na disposição das pétalas. As pétalas estão organizadas de forma compacta e possibilitam a maximização na captação da energia luminosa. Os exemplos a seguir apresentam as flores que possuem pétalas com a sequência de Fibonacci, ou com variações próximas:

3 pétalas: lírio, açucena, íris, trandescância;

5 pétalas: botão de ouro, rosa selvagem, *columbine*, esporas, capuchinha;

8 pétalas: *delphiniums*, anémona;

13 pétalas: malmequer, cineraria, *ragwort*;

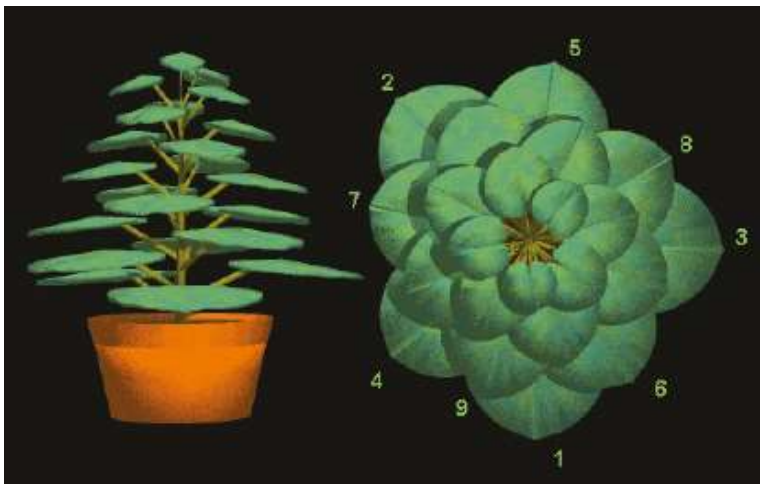
21 pétalas: áster, olhado preto, susana, chicória;

34 pétalas: tanchagem, píretro, dália;

55 e 89 pétalas: margaridas (várias), a família *Asteraceae*.

Os arranjos das folhas de algumas plantas em torno do caule também representam números de Fibonacci. A partir deste arranjo, todas as folhas conseguem captar a energia dos raios solares de igual forma. Com esta apresentação geométrica o escoamento da água torna-se também mais fácil, fazendo com que a planta não seja danificada mesmo com uma grande precipitação.

Figura 3.13 – Exemplo do número de ouro na natureza.



Fonte: Recordando Matemática (2014)

Hípaso de Metaponto (470 – 400 a.C.) verificou que ao unir os pontos de um pentágono regular em seus vértices é gerada uma estrela e no seu interior pode ser observado outro pentágono de dimensão inferior ao inicial, Figura 3.3. A partir da manipulação das médias dos segmentos de reta é possível encontrar a razão, $\frac{1+\sqrt{5}}{2} = 1{,}61880339$, que ficou conhecida por razão áurea, sendo encontrada em diversas formas na natureza e construções antigas.

Número de Ouro

A proporção áurea, é um número irracional representado pelo símbolo ϕ, ϕ= 1,6180339227498…, que deve ser obtido pela sequência de Fibonacci, pode ser descrito pela razão entre o comprimento de dois segmentos a e b com a > b > 0, dado por [34], [35]:

$$\frac{a}{b} = \frac{a+b}{a} \rightarrow \phi = 1 + \frac{1}{\phi} \rightarrow \phi = 1 + \frac{1}{1+\phi} \rightarrow 1 + \frac{1}{1+\frac{1}{1+\frac{1}{1+\cdots}}} \cong 1.6180 \ldots,$$

em que $\phi = a/b$. Uma possível visualização da proporção áurea é aproximada pelo Número de Lucas, com a proporção dos números naturais ($\mathbb{N}$). É dada pela divisão de um número posterior pela soma dos números predecessores. A Tabela 2 é apresentado o Números de Lucas em representação racional e decimal.

Tabela 2: Número de Lucas.

n	Representação racional	Valor decimal
0	1	1.00000
1	2/1	2,00000
2	(2+1)/2 = 3/2	1,50000
3	(3+2)/3 = 5/3	1,66666
4	(5+3)/5 = 8/5	1,60000
5	(8+5)/8 = 13/8	1,62500
6	(13+8)/13 = 21/13	1,61539
7	(21+13)/21 = 34/21	1,61905
8	(34+21)/34 = 55/34	1,61768
9	(55+34)/55 = 89/55	1,61878
10	(89+55)/89 = 144/89	1,61798

Neste trabalho, a proporção áurea é utilizada para calcular a dimensão dos cortes na folha elíptica e aumentar o perímetro das antenas para alterar a frequência de ressonância.

4.Tecnologias WLAN e 4G

As tecnologias de comunicação sem fio utilizam protocolos que para operação em sistemas e operações diferentes, como sistemas de comunicações móveis e de redes locais. Dentre elas podem ser destacadas as redes WLAN e as redes 4G, com ampla operacionalização no Brasil [36].

A tecnologia WLAN foi ratificada em 1997 com o protocolo 802.11, com amplo uso em residências, indústrias, comércios, hospitais, zonas militares, dentre outros, com taxas de transferência de dados de até 54 Mbps, operando nas faixas de 2.4 GHz e 5 GHz, considerada uma tecnologia pervasiva, flexível, com a capacidade de conexão de múltiplos usuários e pontos de acessos [37].

O padrão de comunicação da tecnologia 4G no Brasil utiliza o modelo LTE (*Long Term Evolution*), operando nas faixas de 2,5 GHz a 2,69 GHz, na banda LTE *Advanced* em duas partes, 2,5 GHz a 2,57 GHz e 2,62 a 2,69 GHz [38]. A rede 4G oferece recursos superiores aos da rede 2G e 3G, com as características de [39,40]:

Taxa de pico – *Downlink*: 1 Gbps, *Uplink*: 500 Mbps;

Largura de banda maior que 70MHz para *downlink* e 40 MHz para *uplink*;

Taxa de transferência média para o usuário três vezes maior do que no LTE;

Capacidade três vezes maior do que no LTE, refletida como a eficiência do espectro;

Eficiência Espectral – *Downlink:* 30 bps/Hz, *Uplink*: 15 bps/Hz;

Flexibilidade do espectro: suporte à agregação espectral e largura de banda escalável;

Sistema de antenas MIMO e SIMO;

Latência menor que 10ms;

Mobilidade de até 350 km/h;

Modulação dos tipos QPSK, 16 QAM e 64 QAM;

Protocolos de operação FDD, TDD e IP;

Operação em ATDMA, CDMA, OFDM, e operação em banda ultra larga (*UltraWide Band* – UWB).

5.Resultados e Discussões

O projeto da antena bioinspirada na folha elíptica, com as antenas simulada e o protótipo, podem ser observadas na Figura 5.1 e os valores das dimensões na Tabela 3. Na primeira etapa, é utilizado o perímetro da estrutura euclidiana como valores iniciais. No trabalho utilizou-se a dimensão da antena quadrada monopolo pela Equação 19. A folha elíptica, Figura 5.1(*b*), para as dimensões de comprimento (L) e largura (W), foram geradas pela fórmula de Gielis no MATLAB ® com os parâmetros:

$m = 2$, $n_1 = 400$, $n_2 = 1200$, $n_3 = 1200$, $a = 1$, $b = 1$.

Os valores dos eixos x, y e z são ajustados pelo A = 36,16, ângulo do círculo passo de H = 360°, e o intervalo de $f_i = [0{:}\pi/(H){:}2\pi]$. O código MATLAB® utilizado na folha elíptica foi:

```
x = (r.×cos(fi));
x = x./max(abs(x))./3;
y = r.*sin(fi);
y = y./max(abs(y));
z = zeros(size(y));
x = A.*(0,125.*x)';
y = A.*y'.*0,318;
z = A.*z'.
```

A imagem foi exportada em formato DXF e importada no software de simulação Ansys.

Na Figura 5.1 pode ser observada a folha elíptica calculada pela razão áurea, utilizada no corte da antena, para o aumento do perímetro e redução da frequência de ressonância. A estrutura calculada para dimensão de comprimento (L_{GR}) e largura (W_{GR}), foi gerada pelo uso da proporção áurea no comprimento e na largura da antena elíptica, com duas interações de L_{An}, e uma para W_l, mantendo a forma regular entre comprimento e largura.

1º L – Interação para L_{An} = 23 mm, $L_{GR} = \frac{23}{1,618} = 14,2\text{mm}$

2º L – Interação para L_{An} = 14,2 mm, $L_{GR} = \frac{14}{1,618} = 8,8\text{mm}$

1º W – Interação para W_{An} = 3 mm, $W_{GR} = \frac{3}{1,618} = 1,85\text{mm}$

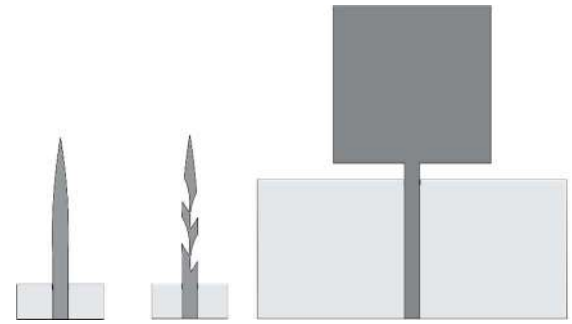
A largura da linha de transmissão calculada (W_{LT}) foi de 2,8 mm, a largura da fenda no plano de terra (W_S) com o melhor resultado foi de 3 mm e o comprimento da fenda no plano

de terra (L_S) foi de 1 mm para a antena bioinspirada, e 2 mm para o monopolo quadrado. A antena de folha elíptica observada apresentou redução no comprimento da antena de 36%, e na largura de 80%, com estrutura mais compacta.

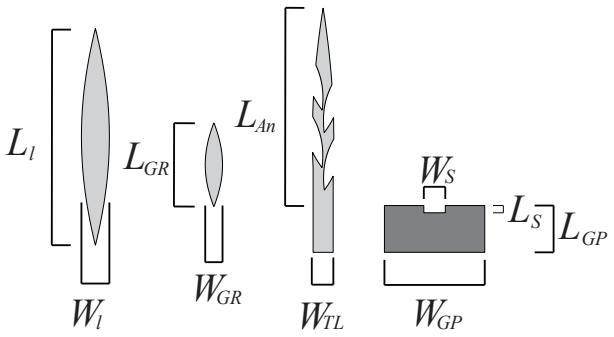
Tabela 3: Dimensões dos monopolos (mm).

Antena	L_l	L_{An}	W_{Ant}	L_{GP}	W_{GP}	L_S	W_S	L_{TL}	W_{TL}
Folha elítica	23,00	36,16	3,00	15,00	12,00	1,00	3,00	16,00	2,80
Quadrado	29,00	29,00	29,00	28,00	60,00	2,00	3,00	31,00	2,80

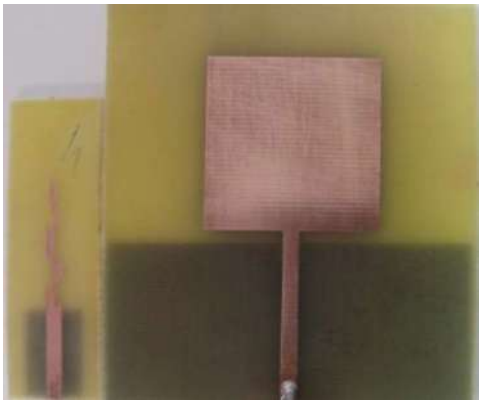
Figura 5. 1 – Projeto das antenas monopolo planares simulados: a) antena de folha elíptica, com cortes e a forma quadrada; b) folhas e antena com as dimensões; c) protótipo.



(*a*)



(*b*)



(c)

Fonte: Autor (2022)

Uma antena é avaliada de acordo com os resultados de seus parâmetros, como o coeficiente de reflexão, dado pelo parâmetro S_{11}, no qual pode-se observar a largura de banda, a frequência de ressonância e o melhor resultado na perda de retorno. Outros parâmetros importantes são o ganho, dado em dBi, que é o ganho em dB em relação a uma antena isotrópica, a largura do feixe de meia potência, com a indicação do ângulo de radiação da antena em graus, a densidade de corrente na superfície da estrutura, e a relação axial, na qual o tipo de polarização da antena pode ser identificado.

O parâmetro S_{11} é o coeficiente de reflexão da porta 1, o nível de potência que é recebido pela porta 1 em dB. Assim, quanto menor o valor, mais potência é radiada pela antena e menor a potência devolvida à porta. Na avaliação da largura de banda da antena são considerados valores abaixo de -10 dB, indicando que o casamento das impedâncias da linha de transmissão e do elemento radiante garante que 90% da potência esteja sendo utilizada pela antena.

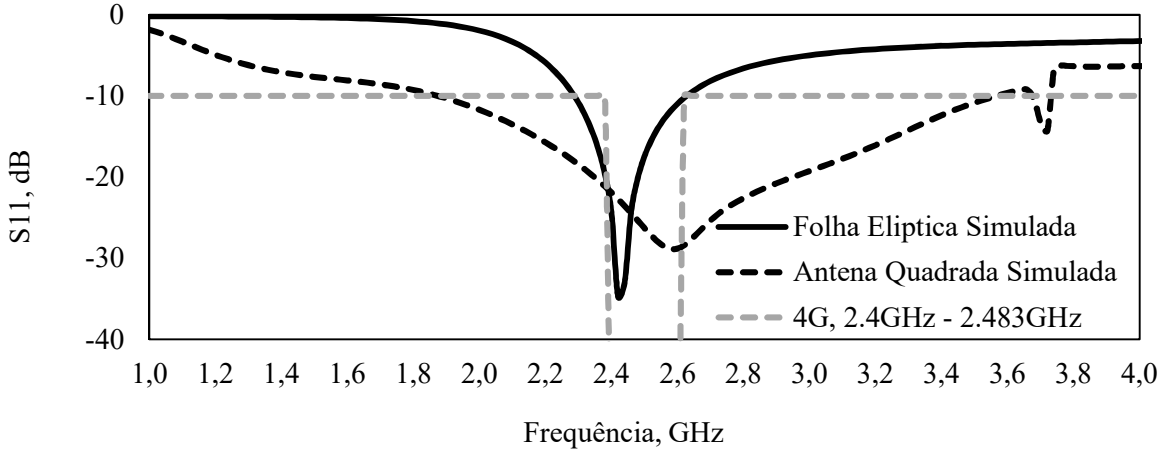
Um parâmetro importante é a largura de banda, na faixa de frequência entre - 10 dB, pois indica que há um casamento de impedâncias entre a linha de transmissão e o elemento radiante, garantindo a potência mínima devolvida à fonte e a potência máxima radiada pela antena. No resultado, pode-se observar a frequência de ressonância central, que deve apresentar a mínima perda de retorno. Quanto maior a largura de banda, maior a quantidade de dados que podem ser enviados ou recebidos pela antena, e para cada tecnologia há uma largura de banda de operação e as antenas devem operar dentro do nível exigido.

Na Figura 5.2 pode ser observada a comparação das simulações da antena monopolo de folha elíptica, com a antena com o corte realizada pela proporção áurea e a antena quadrada sem o refletor. O corte realizado pela proporção áurea aumentou o perímetro da antena monopolo, com a alteração da frequência de ressonância, 2,76 GHz para a folha, e 2,42 GHz para a folha com o corte realizado pela proporção áurea, uma variação de 12,32%. Nos resultados, pode-se observar um aumento da largura de banda de 160 MHz, sendo 240 MHz para a folha, e 400 MHz para a folha com o corte pela proporção áurea Figura 5.2(*b*).

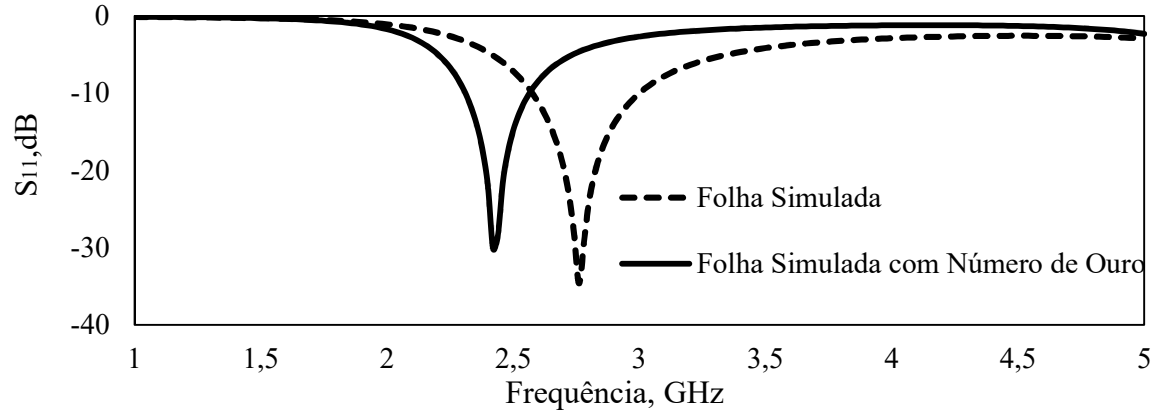
A comparação da forma quadrada simulada e da antena monopolo bioinspirada com o corte pela proporção áurea com refletor pode ser visualizada na Figura 5.2(*a*). A antena monopolo quadrada apresenta resultado em -10 dB nas frequências de 1,88 GHz a 3,58 GHz, com largura de banda de 1,7 GHz e frequência de ressonância central em 2,62 GHz. A folha elíptica obteve resultados em -10 dB nas frequências de 2,3 GHz a 2,62 GHz, com largura de banda de 320 MHz e frequência de ressonância central em 2,42 GHz. Na comparação do

monopolo quadrado e a antena monopolo direcional bioinspirada na folha elíptica se pode observar uma redução de 81,18% na largura de banda, abrangendo a banda 4G em 2,5 GHz.

Figura 5. 2 – Simulação das antenas monopolo planares: a) antena de folha elíptica e a forma quadrada; b) antena de folha elítica com e sem os cortes.



(*a*)



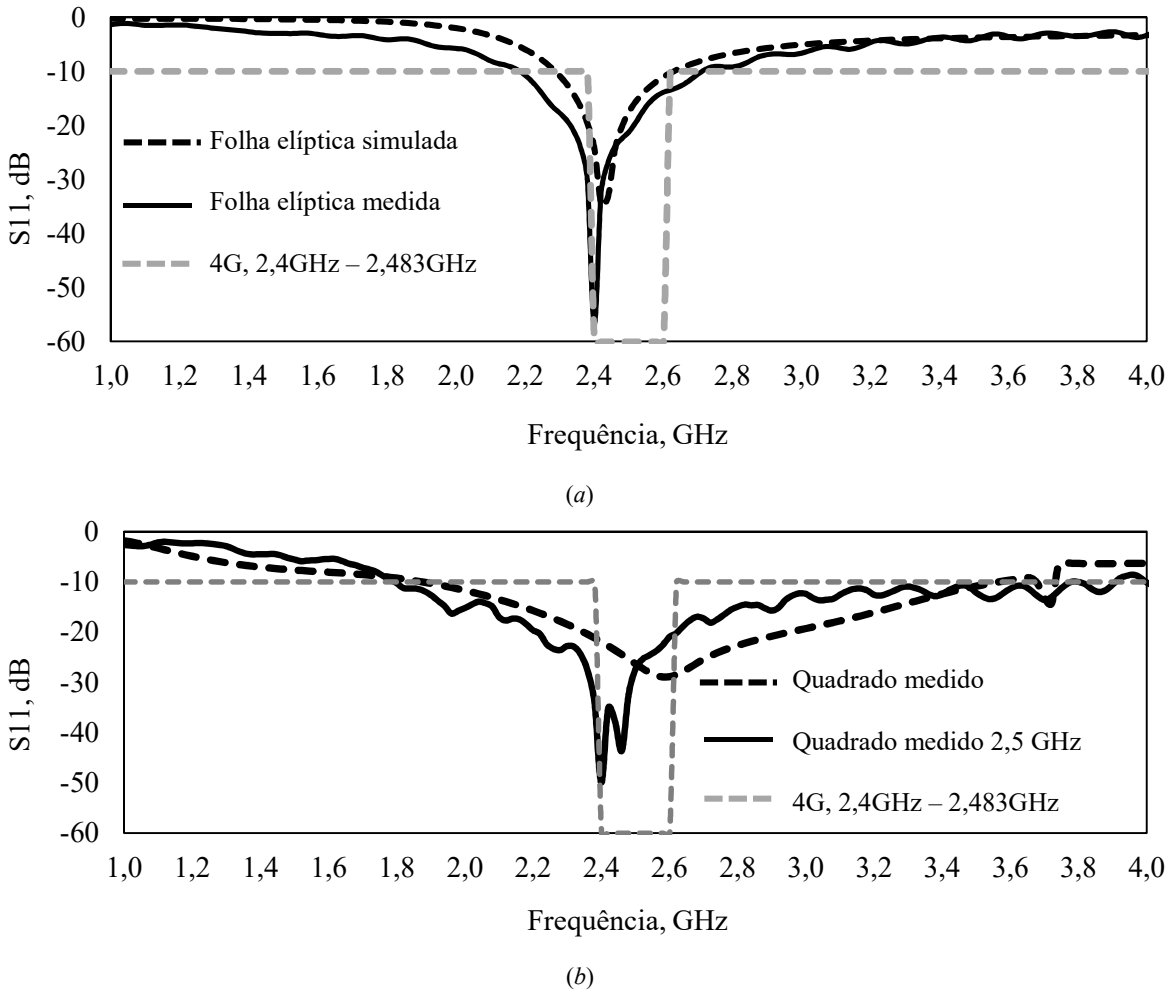
(*b*)

Fonte: Autor (2022)

Uma comparação entre os parâmetros S_{11} dos resultados simulados e medidos das antenas monopolo direcionais de formato quadrado e folha elíptica pode ser observada na Figura 5.3. A partir dos resultados é possível observar que a antena medida apresenta uma largura de banda de 500 MHz, 34% maior que na simulação, com frequência de ressonância em 2,4 GHz, uma diferença de 0,88%. A diferença na largura de banda e na frequência de ressonância pode ser atribuída a variações na estrutura dielétrica, cobrindo a banda 4G em 2,5 GHz, Figura 5.3(*a*). A antena monopolo quadrada obteve valores próximos de largura de banda,

simulados em 1,7 GHz e medidos em 2,2 GHz, com frequências de ressonância de 2,58 GHz e 2,4 GHz, diferença de 1,65%, Figura 5.3(*b*).

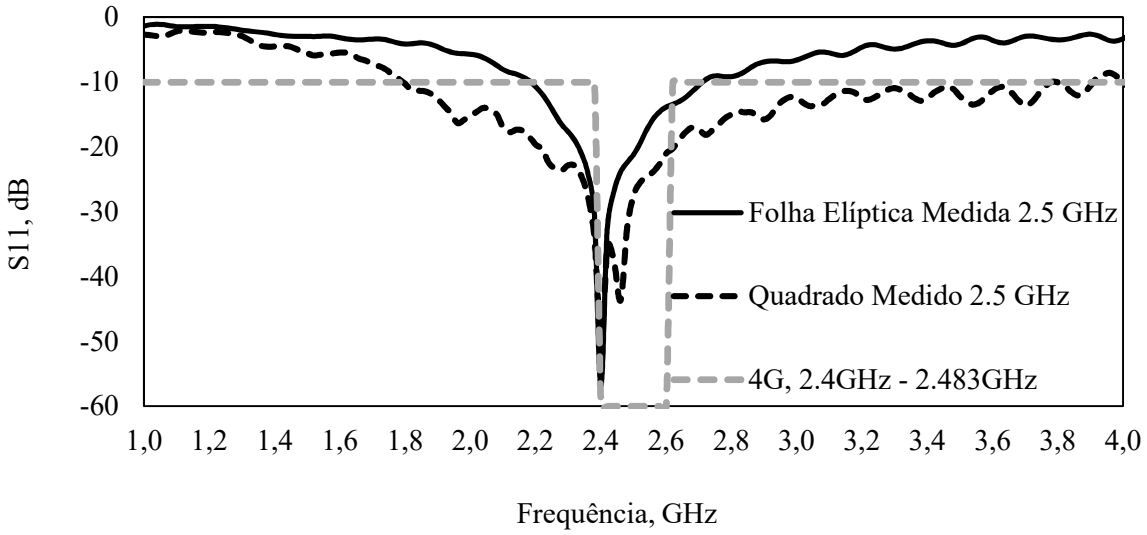
Figura 5. 3 – Comparação dos resultados simulados e medidos de antenas monopolos direcionais: a) folha elíptica; b) forma quadrada.



Fonte: Autor (2022)

Na Figura 5.4 pode ser observada a comparação entre os parâmetros S_{11} medidos das antenas monopolo direcionais de formato quadrado e folha elíptica, e os valores da Tabela 3. Observa-se que a antena monopolo bioinspirada na folha elíptica apresenta uma largura de banda mais concentrada cobrindo a banda 4G, em 2,5 GHz, e maior perda de retorno, inferior a -56 dB, em uma estrutura mais compacta. Considerando a área da antena refletora e monopolo, o monopolo direcional quadrado apresenta uma área total de 1039,35 cm³, e o monopolo bioinspirada na folha elíptica de 20,81 cm³, com uma redução de 98%.

Figura 5. 4 – Comparação de resultados medidos de forma quadrada e antena monopolo direcional de folha elíptica.



Fonte: Autor (2022)

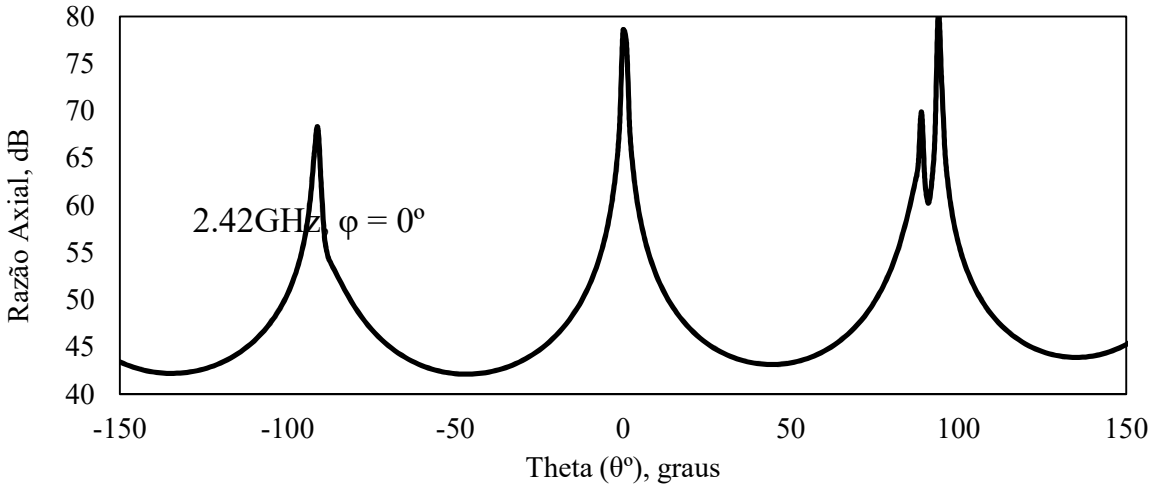
Tabela 4: Resultados de antenas monopolo medidas (mm).

Antena	***BW (MHz)***	***f_1 (GHz)***	***f_2 (GHz)***	***f_0 (GHz)***	***Gain (dBi)***
Folha Elíptica	500	2,20	2,70	2,40	6,28
Quadrado	2240	1,80	4,04	2,46	7,53

A razão axial indica a polarização circular de uma antena, podendo receber ou enviar um sinal em qualquer posição, com o coeficiente de transmissão, independente da posição do dispositivo. A razão axial pode ser definida como a razão entre o eixo maior e menor de um padrão de antena circularmente polarizado. Se uma antena tem polarização circular perfeita, então esta relação é 1 (0 dB). Uma antena com polarização circular é composta por duas componentes ortogonais de campo elétrico de igual amplitude e defasadas em 90 graus, quanto mais próxima a relação axial estiver de 0 dB, melhor [23]. Uma antena com polarização circular deve receber ou transmitir um sinal em qualquer posição angular. Na Figura 5.5 podem ser visualizados os resultados simulados da razão axial da antena monopolo bioinspirada na folha elíptica. O resultado indica a polarização circular da antena bioinspirada, com ganho máximo em dB, no ângulo teta, $\theta = 0^{o}$.

.

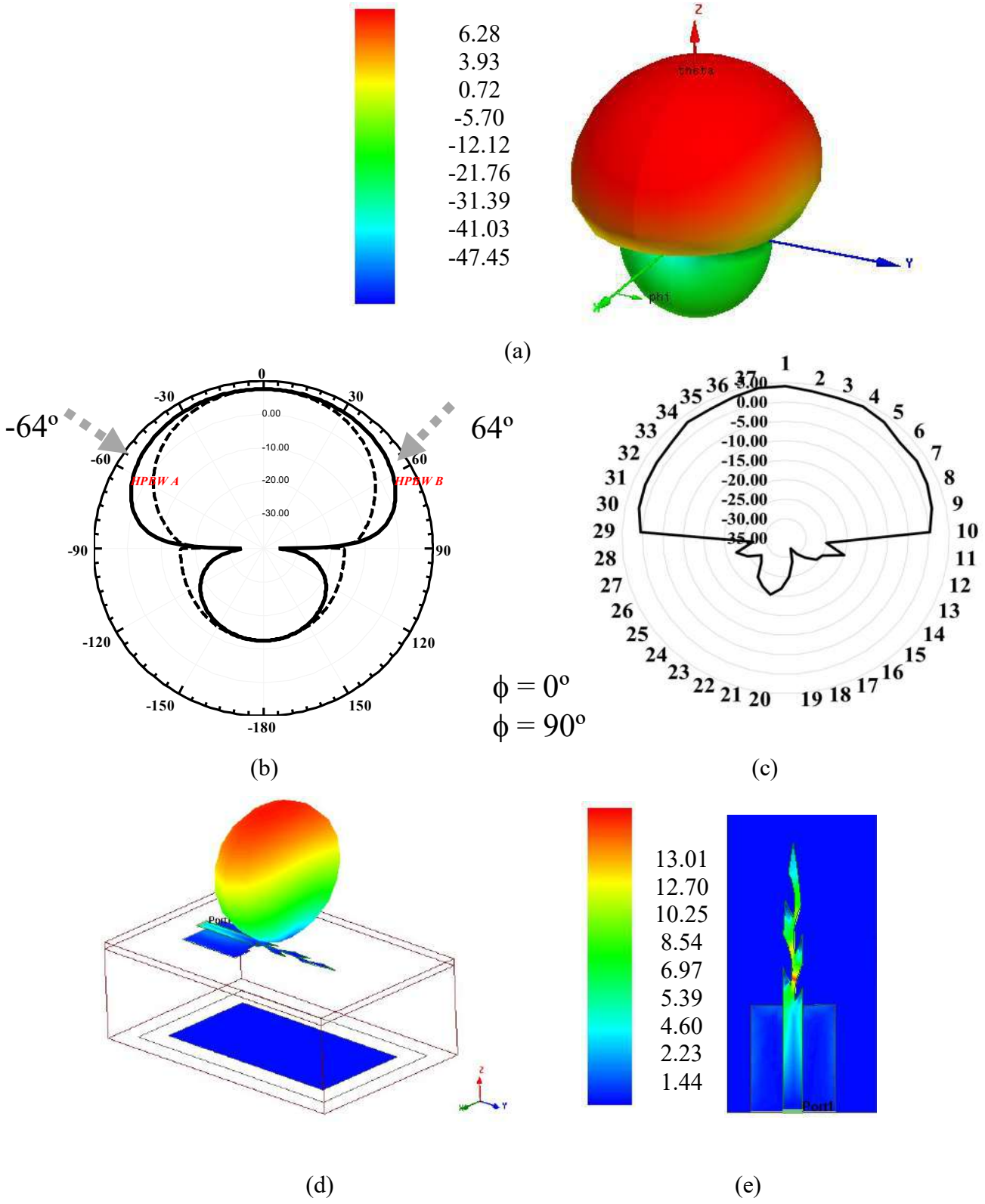
Figura 5. 5 – Simulação da razão axial da antena monopolo bioinspirada na folha elíptica com abertura de acordo com o número de ouro.



Fonte: Autor (2022)

O diagrama de radiação informa a direção do campo elétrico, plano E, e do campo magnético, plano H. A direção de propagação da onda eletromagnética pode ser observada pelo plano E, com a marca de largura de feixe de meia potência (*Half Power Beamwidth* – HPBW). Na Figura 5.6 podem ser visualizados os resultados simulados e medidos do diagrama de radiação e densidade de corrente da antena monopolo direcional elíptica e o valor do ganho na Tabela 3. As antenas monopolo quadrada e elíptica obtiveram valor de ganho próximos, Figura 5.6(a), com HPBW da antena monopolo elíptica de 128º no plano-E, do tipo setorial, com ganho semelhante ao diagrama de radiação de uma antena diretiva, Figura 5.6(b), diagrama de radiação medido semelhantes, Figura 5.6(c), e alta densidade de corrente, 13,01 A/m², Figura 5.6(e). Assim, a partir do uso da técnica é possível obter um diagrama de radiação direcional, gerado por uma antena omnidirecional, com características de banda larga em uma estrutura compacta.

Figura 5. 6 – Diagrama de radiação de antena monopolo direcional em folha elíptica: a) Ganho simulado, 3D realizado no Ansys 2016; b) HPBW simulado, 2D plano-E e plano-H realizado no Ansys 2016; c) Diagrama de radiação medido do monopolo bioinspirado com refletor; d) Diagrama de radiação simulado do monopolo bioinspirado com refletor realizado no Ansys 2016; e) Densidade de corrente simulada com antena monopolo realizada no Ansys 2016.



Fonte: Autor (2022)

A antena monopolo direcional bioinspirada proposta usou o formato da folha elíptica utilizando duas técnicas no desenvolvimento do projeto. Primeiro são os cortes no elemento radiante das formas semelhantes da folha elíptica reduzidas, calculadas pela razão áurea, para o aumento do perímetro da antena por sintonia da frequência de ressonância, sendo o primeiro trabalho a utilizar esta técnica em uma antena bioinspirada. A segunda técnica utiliza um refletor no plano de terra para alterar os parâmetros da antena, foi observada em [20] e utilizada na antena monopolo bioinspirada em plantas em [4], com a avaliação da mudança de largura de banda, densidade de corrente e ganho.

A comparação dos resultados das antenas monopolo direcionais bioinspiradas em folha elíptica e cana-de-açúcar [4] pode ser observada na Tabela 4. A folha elíptica apresenta largura de banda 203%, e densidade de corrente 130,67% maior da antena cana-de-açúcar. A densidade de corrente da elíptica está relacionada às menores dimensões da cana-de-açúcar, e maior dissipação de calor pelo efeito Joule. O maior ganho observado na cana-de-açúcar se deve à maior quantidade de metal no elemento radiante.

Tabela 5: Comparação das antenas direcionais monopolo bioinspiradas em folha elíptica e cana-de-açúcar [4].

Antena	***BW (MHz)***	***HPBW***	***Gain (dBi)***	***Current density (A/m^2)***
Folha Elíptica (2.5 GHz)	500	128º	6,28	13,01
Cana-de-Açúcar (700 MHz)	165	120º	7,7	5,64

6.Considerações Finais

Nesta Dissertação, desenvolveu-se uma antena direcional monopolo bioinspirada na folha elíptica, com corte calculado pela proporção áurea, em material de baixo custo, FR4, gerada pela fórmula de Gielis, aplicada a WLAN e banda 4G em 2,5 GHz. Duas técnicas são aplicadas no desenvolvimento da antena, o corte do elemento radiante pela proporção áurea, para o aumento do perímetro da antena, com a modificação da frequência de ressonância pelo uso de uma placa condutora junto ao plano de terra, promovendo mudanças nos parâmetros da antena, como largura de banda, ganho e diagrama de radiação. Os resultados da antena monopolo bioinspirada foram comparados com a antena monopolo quadrada, em que a forma bioinspirada obteve uma estrutura mais compacta com área 98% menor do que a forma quadrada, diagrama de radiação direcional, ganho máximo de 6,28 dBi, polarização circular e características de banda larga, com largura de banda de 500 MHz, largura de feixe de meia potência de 128º, abrangendo a banda 4G, em 2,5 GHz, e WLAN, em 2,4 GHz. Utilizando um refletor próximo ao plano de terra da antena monopolo foi possível obter características de antenas direcionais a partir de antenas omnidirecionais, sem alterar a estrutura monopolo.

6.1. Trabalhos futuros

Como trabalhos futuros podem ser propostos:

- Avaliar o uso de formas bioinspiradas em folha elíptica para o desenvolvimento de estruturas EBG (*Electromagnectic Band Gap*);
- Propor o uso de algoritmos bioinspirados para otimização dos parâmetros da antena.

6.2. Publicações

Periódico

FROES, EDUARDA; SILVA JUNIOR, PAULO F.; SANTANA, EWALDO E. C.; SOUSA JUNIOR, CARLOS M.; SILVA, PAULO H. F.; CRUZ, CARLOS A. M.; AQUINO, VIVIANNE S.; CASTRO, LUIS S. O.; FREIRE, RAIMUNDO C. S.; PINTO, MAURO S. S. Monopole directional antenna bioinspired in elliptical leaf with golden ratio for WLAN and 4G applications. Scientific Reports, v. 12, p. 18654, 2022.

Congresso Internacional

ANDRADE, M.; FREIRE, R. C. S.; SILVA JUNIOR, P. F.; SANTANA, E. E. C.; SANTOS, E. F.; SOUZA, M. G.; SOUZA, A. S.; SERRES, A. J. COMPACT MONOPOLE ANTENNA FOR SMART METER APPLICATIONS IN ISM BAND 900MHz. In: 25th IMEKO TC4 International Symposium, 2022, Brescia. IMEKO TC-4 2020, 2022. p. 1-5.

Patente

SILVA JUNIOR, P. F.; SANTOS, E. F.; SANTANA, E. E. C.; PINTO, M. S. S.; SILVA, P. H. F. ANTENA MONOPOLO DIRECIO ANDRADE, M.; FREIRE, R. C. S.; SILVA JUNIOR, P. F.; SANTANA, E. E. C.; SANTOS, E. F.; SOUZA, M. G.; SOUZA, A. S.; SERRES, A. J. COMPACT MONOPOLE ANTENNA FOR SMART METER APPLICATIONS IN ISM BAND 900MHz. In: 25th IMEKO TC4 International Symposium, 2022, Brescia. IMEKO TC-4 2020, 2022. p. 1-5.

NAL BIOINSPIRADA EM UMA FOLHA ELÍPTICA. 2022, Brasil. Patente: Privilégio de Inovação. Número do registro: BR10202201654, título: "ANTENA MONOPOLO DIRECIONAL BIOINSPIRADA EM UMA FOLHA ELÍPTICA", Instituição de registro: INPI - Instituto Nacional da Propriedade Industrial. Depósito: 19/08/2022 Instituição financiadora: UEMA.

Referências Bibliográficas

1. SILVA JUNIOR, P. F.; SANTANA, E. E. C.; PINTO, M. S. S. Flexible Wearable Pre-fractal Antennas for Personal High-Temperature Monitoring. Wireless Personal Communications. **Wireless Pers Commun**, p. 1983–1998, 2020.
2. DA SILVA, P. F.; SANTANA, E. E. C.; CRUZ, C. A. M. Compact Bioinspired Antenna for WLAN 5 GHz Application. **Wireless Pers Commun**, Chichester, v. 119, p. 329–341, 2016.
3. MALHAT, H. A.; ELGIDDAWY, S.; ZAINUD-DEEN. Circularly/Linearly Polarized Low-Profile Plasma Microstrip Antenna for MIMO Applications. **Wireless Pers Commun**, Chichester, v. 124, p. 1977–1992, 2022.
4. SILVA JUNIOR, P. F. et al. Bio-inspired design of directional leaf-shaped printed monopole antennas for 4G 700 MHz band. **Microwave and Optical Technology Letters**, p. 1529-1533, 2016.
5. SILVA, P. F. et al. Wearable textile bioinspired antenna for 2G, 3G, and 4G systems. **Microwave and Optical Technology Letters**, p. 2818-2823, 2016.
6. GIELIS, J. A generic geometric transformation that unifies a wide range of natural and abstract shapes. **American Journal of Botany**, p. 333-338, 2003.
7. AZIM, R. et al. An octa-band planar monopole antenna for portable communication devices. **Scientific Report**, 2021.
8. GOLEZANI, J. J.; ABBAK, M.; AKDUMAN, I. Modified directional wide band printed monopole antenna for use in radar and microwave imaging applications. **Progress In Electromagnetics Research Letters**, p. 119-129, 2012.
9. ALAM, T. et al. Metamaterial array based meander line planar antenna for cube satellite communication. **Scientific Reports**, 2021.
10. GIELIS, J. **The Geometrical Beauty of Plants.** [S.l.]: Atlantis Press Paris, 2017.
11. SILVA JUNIOR, P. F. et al. Bio-Inspired Wearable Antennas. **Wearable Technologies**, p. 219-237, 2018.
12. VAN AMERONGEN, H. . C. R. Light harvesting in photosystem II. **Photosynthesis Research**, p. 251-263, 2013.
13. LOKSTEIN, H.; GERNOT, R.; GÖTZE, J. P. Photosynthetic Light-Harvesting (Antenna) Complexes—Structures and Functions. **Molecules**, p. 1-24, 2021.
14. SILVA JUNIOR, P. F. et al. Fractal and Polar Microstrip Antennas and Arrays for Wireless Communications. In: Mutamed Khatib. **Wireless Mesh Networks - Security, Architectures and Protocols.**, p. 87-107, 2019.
15. OLIVEIRA, A. C. et al. Application of bioinspired antennas in the monitoring of high voltage circuit breakers. **IEEE Transactions on Power Delivery**, 2022.
16. BALANIS, C. A. **Antenna Theory:** Analysis and Design. Rio de Janeiro: LTC, 2005.
17. STUTZMAN, G. A. T. W. L. **Antenna Theory and Design.** [S.l.]: PAPERBACKSHOP UK IMPORT, 2012.
18. BALANIS, C. A. **Modern antenna handbook**. [S.l.]: [s.n.], 2016.
19. GROSS, F. B. **Smart Antennas with MATLAB**. San Francisco: McGraw Hill, 2015.

20. BIRD, T. S. **Fundamentals of Aperture Antennas and Arrays - From Theory to Design, Fabrication and Testing**. Bird, Trevor S.: Wiley, 2016.
21. EVANGELISTA, A. S. F. **Desenvolvimento de antenas em poliamida com a geometria pre-fractal de koch**. São Luis: [s.n.], 2020.
22. TREVOR, S. B. **Fundamentals of Aperture Antennas and Arrays:** From Theory to Design. WILEY: [s.n.], 2016.
23. P. F. SILVA JUNIOR. **Desenvolvimento de Antenas Bioinspiradas em Plantas para Banda WLAN**. Campina Grande: [s.n.], 2016.
24. HARAZ, O.; SEBAK, A. R. Advancement in Microstrip Antenna with Recent Applications. **Rijeka**, p. 125-152, 2013.
25. ASKARPOUR, A. N.; GHOLIPOUR, A.; FARAJI-DANA, R. A Band-notched tulip antenna for UWB applications. **EuMC 2008. 38th European Microwave Conference**, 27 Otubro 2008. 881-884.
26. AHMED, O. M. H.; SEBAK, A. R. A Novel Maple-Leaf Shaped UWB Antenna With a 5.0-6.0 GHz Band-Notch Characteristic. **Progress In Electromagnetics Research**, v. 11, p. 39-49, 2009.
27. ZEIGER, L. T. E. E. **Fisiologia Vegetal**. Porto Alegre: Artmed, 2006.
28. UNIVERSITY, S. L. Natural Antenna: Structure & Efficiency, 2014. Disponivel em: <http://parc.wustl.edu/research/themes/natural>. Acesso em: 25 junho 2022.
29. CRUZ, R. O. A. **Licenciatura em Biologia - Botânica Geral e Comparada II**. Salvador: [s.n.], 2014.
30. MAJEROWICS, N. **Fisiologia Vegetal**. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 2004.
31. MACCCULLOUGH, S.; RUPERT, K. C. **Botany Handbook for Florida**. Gainesville: IFAS, 1989.
32. CARVALHO, M. C. C. E. S. **Padrões Numéricos e Sequencias**. São Paulo: Moderna, 1997.
33. BIEMBEGUT, M. S. **Número de Ouro e Secção Áurea**. São Paulo: Edifurb, 1998.
34. HOLLOS, S.; HOLLOS, J. R. In: _____ **Art of Golden Ratio**. [S.l.]: Abrazol Publishing, 2015.
35. DUMLAP, R. A. In: _____ **The Golden Ratio and Fibonacci Numbers**. [S.l.]: World Scientific, 2003.
36. BRASIL. Mapa da telefonia móvel no país por tecnologia (2G, 3G e 4G). **Anatel**. Disponivel em: <https://www.gov.br/anatel/pt-br/regulado/universalizacao/mapa-da-telefonia-movel-no-pais-por-tecnologia-2g-3g-e-4g.>. Acesso em: 04 Julho 2022.
37. PEJMAN, R. . J. Wireless LAN Fundamentals. **Cisco Press**, 2004.
38. TELECO. 4G: Frequências e Licitações. **Teleco.com**. Disponivel em: <https://www.teleco.com.br/4g_freq.asp.>. Acesso em: 04 Julho 2022.
39. CARRIEL, V. S. A evolução do LTE até o padrão 4G de 1Gbits/s. **Revista de Tecnologia da Informação e Comunicação**, v. 3, p. 30-33, 2013.
40. FERRAZ, L. G. C.; GARCIA, R. R. G.; NUNES, D. Estudo comparativo entre sistemas propostos para 4G: LTE e WiMAX móvel.. **INATEL – INCITE**, p. 73-78, 2012.
41. DA SILVA, P. F.; SANTANA, E. E. C.; CRUZ, C. A. M. Compact Bioinspired Antenna for WLAN 5 GHz Application. **Wireless Pers Commun**, 2021329-341.

42. SILVA, P. F. J. **Arranjos de antenas bioinspiradas desenvolvidos pela expressão de**. Campina Grande: [s.n.], 2017.