



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA
CURSO DE BACHARELADO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA

ADILINO SENA MAIA

**ANÁLISE COMPARATIVA DE ANTENAS DE MICROFITA COM GEOMETRIA
DE *PATCHES* ELÍPTICO E BIOINSPIRADO NA FOLHA DA CARAIBEIRA PARA
APLICAÇÃO EM UWB**

CARAÚBAS/RN

2018

ADILINO SENA MAIA

**ANÁLISE COMPARATIVA DE ANTENAS DE MICROFITA COM GEOMETRIA
DE *PATCHES* ELÍPTICO E BIOINSPIRADO NA FOLHA DA CARAIBEIRA PARA
APLICAÇÃO EM UWB**

Monografia apresentada a Universidade
Federal Rural do Semi-Árido como requisito
para obtenção do título de Bacharel em Ciência
e Tecnologia.

Orientador: Hugo Michel Câmara de Azevedo
Maia

CARAÚBAS/RN

2018

©Todos os direitos estão reservados à Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996, e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tornar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata, exceto as pesquisas que estejam vinculadas ao processo de patenteamento. Esta investigação será base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) seja devidamente citado e mencionado os seus créditos bibliográficos.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Biblioteca Central Orlando Teixeira (BCOT)
Setor de Informação e Referência (SIR)
Setor de Informação e Referência

M217a Maia, Adilino Sena.
ANÁLISE COMPARATIVA DE ANTENAS DE MICROFITA COM
GEOMETRIA DE PATCHES ELÍPTICO E BIOINSPIRADO NA
FOLHA DA CARAIBEIRA PARA APLICAÇÃO EM UWB /
Adilino Sena Maia. - 2018.
59 f. : il.

Orientador: Hugo Michel Câmara de Azevedo Maia.
Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de Ciência e
Tecnologia, 2018.

1. Antena de microfita. 2. Patch elíptico. 3.
Patch bioinspirado. 4. UWB. I. Maia, Hugo Michel
Câmara de Azevedo, orient. II. Título.

Bibliotecário-Documentalista
Nome do profissional, Bib. Me. (CRB-15/10.000)

ADILINO SENA MAIA

**ANÁLISE COMPARATIVA DE ANTENAS DE MICROFITA COM GEOMETRIA
DE *PATCHES* ELÍPTICO E BIOINSPIRADO NA FOLHA DA CARAIBEIRA PARA
APLICAÇÃO EM UWB**

Monografia apresentada a Universidade
Federal Rural do Semi-Árido como requisito
para obtenção do título de Bacharel em Ciência
e Tecnologia.

Defendida em: ____ / ____ / 2 ____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Hugo Michel Câmara de Azevedo Maia – UFERSA
Presidente

Prof. Dr. Adaildo Gomes D'Assunção Junior- IFPB
Primeiro Membro

Prof. Dr. Dorgival Albertino da Silva Júnior - UFERSA
Segundo Membro

Prof. Me. Juan Rafael Filgueira Guerra - UFERSA
Terceiro Membro

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por sempre me abençoar com saúde, paz e sabedoria, e sempre me guiar para o melhor caminho.

Agradeço a meu pais Eider de Oliveira Maia e Zildete Sena Maia por todo amor, carinho e educação da melhor forma, por acreditarem em mim para ser responsável e independente. Agradeço ao meu irmão Euder Sena Maia por sempre está do meu lado para me ajudar em todos momentos.

A minha irmã Anamaria Sena Maia por ser o motivo de todo meu esforço para conclusão deste trabalho, por servir de inspiração para toda nossa família de como ser uma pessoa simples e batalhadora. Agradeço a minha namorada Laynara Lorranny Santiago Souza, por sempre está do meu lado e me guiar a ser uma pessoa cada vez melhor, por todo seu amor e carinho quando necessitava de um momento de paz.

Ao orientador e amigo Prof. Hugo Michel Câmara de Azevedo Maia, pela confiança, dedicação, por todo o conhecimento adquirido e principalmente pela paciência. Levarei para sempre cada frase de incentivo.

Aos Professores Dr. Adaildo Gomes D'Assunção Junior, Dr. Dorgival Albertino da Silva Júnior e Me. Juan Rafael Figueira Guerra, pela disponibilidade a fazerem parte da banca examinadora, assim como dar suas contribuições.

Aos meus amigos Hemeson Guilherme Teixeira, Paulo Ricardo Oliveira Alves, Lucas Rodovalho Guimarães e Gleidson Leite da Silva por me ajudarem na elaboração desse trabalho.

À instituição UFERSA pela estrutura disponibilizada para realização do trabalho.

“Tentem deixar este mundo um pouco melhor do que o encontraram e, quando chegar a vez de morrerem, possam morrer felizes com o sentimento de que, pelo menos, não desperdiçaram o tempo, mas fizeram o melhor que puderam. Estejam preparados, desta maneira, para viverem e morrerem felizes, sempre fiéis à Promessa Escoteira, até mesmo depois que deixarem de ser jovens. E que Deus os ajude a cumpri-la.”

Robert Stephenson Smyth Baden-Powell

RESUMO

A atual demanda de novas tecnologias implementa a comunicação entre dispositivos. Na interação desses equipamentos, as antenas são importantes componentes, com a necessidade de estruturas com tamanho compacto, custo reduzido e fácil adaptação em sistemas, são aplicadas as antenas de microfitas em diversos estudos. O presente trabalho propõe o desenvolvimento de um estudo comparativo entre a geometria do patch da antena com formato elíptico e com uma forma bioinspirada na folha da Caraibeira, para aplicação em Banda Ultra Larga (*Ultra Wideband* - UWB). Foram analisados quatro casos diferentes para obter as frequências de projeto de cada antena, que apresentam substratos dielétrico de FR4 com permissividade elétrica de 4,4 e plano de terra truncado. As antenas foram projetadas e simuladas no software ANSYS HFSS®, obtendo na maioria dos casos resultados adequados na aplicação em UWB para ambas formas elíptica e bioinspirada.

Palavras-chave: Antena de microfita. *Patch* elíptico. *Patch* bioinspirado. UWB.

ABSTRACT

The current demand for new technologies implements communication between devices. In the interaction of these equipments, the antennas are important components, with the need of structures with compact size, low cost and easy daptation in systems, the microstrip antennas are applied in several studies. The present work proposes the development of a comparative study between the antenna patch geometry with elliptical shape and with a bio - inspired shape in the Carabeira sheet, for application in Ultra Wideband (UWB). Four different cases were analyzed to obtain the design frequencies of each antenna, with FR4 dielectric substrates with an electric permittivity of 4.4 and a truncated earth plane. The antennas were designed and simulated in the ANSYS HFSS® software, obtaining in most cases adequate results in the UWB application for both elliptic and bioinspired forms.

Keywords: Microstrip Antenna. Elliptical patch. Bio-inspired patch. UWB.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Modelos de antenas a) Dipolo b) Corneta piramidal c) Antena de microfita retangular d) Conjunto Yangi-Uda e) Refletor parabólico com alimentador frontal f) Lente com índice de refração maior do que um g) Lente com índice de refração menor do que um.	18
Figura 2: Estrutura básica de uma antena de microfita.	19
Figura 3: Modelos de <i>Patch</i>	20
Figura 4: Gráfico da perda de retorno pela frequência.	22
Figura 5: Tipos de <i>patch</i> elípticos.	24
Figura 6: Antenas de microfita com <i>patch</i> retangular e <i>patch</i> elíptico.	25
Figura 7: Vista frontal e inferior da antena de microfita com <i>patch</i> elíptico.	25
Figura 8: Antena de microfita elíptica.	26
Figura 9: Antena de microfita bioinspirada nas antenas das baratas.	27
Figura 10: Antena de microfita bioinspirada na folha da cana-de-açúcar.	27
Figura 11: Antena de microfita bioinspirada na folha do algodão.	28
Figura 12: Carabeira a) Vista frontal da carabeira b) Flor da carabeira c) Fruto da carabeira.	29
Figura 13: Folha da carabeira utilizada como modelo para o trabalho.	30
Figura 14: Distância p na vista superior da antena.	33
Figura 15: Variação do comprimento de p com a frequência.	34
Figura 16: Antena elíptica com plano de terra truçado a) Vista superior b) vista lateral c) Vista inferior.	36
Figura 17: Antena bioinspiradas na folha da carabeira com plano de terra truçado a) Vista superior b) vista lateral c) Vista inferior.	36
Figura 18: Antenas do caso 1 a) Antena com <i>patch</i> elíptico b) Antena com <i>patch</i> bioinspirado.	40
Figura 19: Antenas do caso 2 a) Antena com <i>patch</i> elíptico b) Antena com <i>patch</i> bioinspirado.	40
Figura 20: Antenas do caso 3 a) Antena com <i>patch</i> elíptico b) Antena com <i>patch</i> bioinspirado.	40
Figura 21: Antenas do caso 4 a) Antena com <i>patch</i> elíptico b) Antena com <i>patch</i> bioinspirado.	40
Figura 22: Perda de retorno caso 1 a) <i>Patch</i> elíptico b) <i>Patch</i> bioinspirado.	41

Figura 23: Perda de retorno caso 2 a) <i>Patch</i> elítico b) <i>Patch</i> bioinspirado.	42
Figura 24: Perda de retorno caso 3 a) <i>Patch</i> elítico b) <i>Patch</i> bioinspirado.	43
Figura 25: Perda de retorno caso 4 a) <i>Patch</i> elítico b) <i>Patch</i> bioinspirado.	43
Figura 26: VSWR caso 1 a) <i>Patch</i> elítico b) <i>Patch</i> bioinspirado.	44
Figura 27: VSWR caso 2 a) <i>Patch</i> elítico b) <i>Patch</i> bioinspirado.	45
Figura 28: VSWR caso 3 a) <i>Patch</i> elítico b) <i>Patch</i> bioinspirado.	46
Figura 29: VSWR caso 4 a) <i>Patch</i> elítico b) <i>Patch</i> bioinspirado.	46
Figura 30: Carta de Smith caso 1 a) <i>Patch</i> elítico b) <i>Patch</i> bioinspirado.	47
Figura 31: Carta de Smith caso 2 a) <i>Patch</i> elítico b) <i>Patch</i> bioinspirado.	48
Figura 32: Carta de Smith caso 3 a) <i>Patch</i> elítico b) <i>Patch</i> bioinspirado.	48
Figura 33: Carta de Smith caso 4 a) <i>Patch</i> elítico b) <i>Patch</i> bioinspirado.	49
Figura 34: Diagramas de radiação 2D e 3D nos planos H e E para o caso 1 a) <i>Patch</i> elítico para frequência de 10,4 GHz b) <i>Patch</i> bioinspirado para frequência de 6,8 GHz.	50
Figura 35: Diagramas de radiação 2D e 3D nos planos H e E para o caso 2 a) <i>Patch</i> elítico para frequência de 6,2 GHz b) <i>Patch</i> bioinspirado para frequência de 6,9 GHz.	51
Figura 36: Diagramas de radiação 2D e 3D nos planos H e E para o caso 3 a) <i>Patch</i> elítico para frequência de 5,9 GHz b) <i>Patch</i> bioinspirado para frequência de 10,2 GHz.	52
Figura 37: Diagramas de radiação 2D e 3D nos planos H e E para o caso 4 a) <i>Patch</i> elítico para frequência de 10 GHz b) <i>Patch</i> bioinspirado para frequência de 6,1 GHz.	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Relação de cada tipo de alimentação de antena de microfita.	23
Tabela 2: Parâmetros constantes das antenas de microfita do trabalho.....	38
Tabela 3: Dimensões das antenas.	39

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

EMAS – *Elliptical Microstrip Antenna* (Antena de Microfita Elíptico);

FCC – *Federal Communication Commission* (Comissão Federal de Comunicação);

FR4 – Material Composto de Fibra de Vidro com Resina de Epoxi;

GPS – *Global Positioning System* (Sistema de Posicionamento Global);

HFSS – High Frequency Structural Simulator (Simulador de Estruturas de Alta Frequência);

LB – Largura de Banda;

PEC – *Perfect Electric Conductor* (Condutor Perfeitamente Elétrico);

TM– *Transverse Magnetic* (Magnético Transverso);

UFERSA – Universidade Federal Rural do Semiárido;

UWB – *Ultra Wideband* (Banda Ultra Larga);

VSWR – *Voltage Standing Wave Ratio* (Taxa de Onda Permanente de Voltagem).

LISTA DE SÍMBOLOS

- a – Semieixo maior da elipse;
- a_{eff} – Semieixo efetivo do *patch* elíptico;
- b – Semieixo menor da elipse;
- c – Velocidade da luz;
- D_{maior} – Dimensão maior;
- D_{menor} – Dimensão menor;
- e – Excentricidade da elipse;
- ϵ_{eff} – Permissividade elétrica do substrato eficaz;
- eixo – Eixo médio da elipse;
- ϵ_r – Permissividade elétrica do substrato;
- f_c – Frequência central do gráfico perda de retorno;
- f_{maior} – Maior frequência de atuação do gráfico perda de retorno;
- f_{menor} – Menor frequência de atuação do gráfico perda de retorno;
- f_p – Frequência de projeto;
- h – Altura do substrato;
- k – Relação da raiz quadrada da permissividade elétrica do substrato eficaz;
- L – Relação para calcular a frequência de projeto do caso 3;
- L_L – Comprimento da linha de microfita;
- L_S – Comprimento do substrato;
- p – Distância da extremidade do *patch* com o plano de terra;
- $P_{perímetro}$ – Perímetro do *patch*;
- $q_{11}^{e,o}$ – Função de Mathieu aproximada para o modo dominante TM_{11} ;
- r – Relação para calcular a frequência de projeto do caso 3;
- t – Altura da fita de cobre do *patch* e do plano de terra;
- W_L – Largura da linha de microfita;
- W_S – Largura do Substrato.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
1.1. MOTIVAÇÃO.....	16
1.2. OBJETIVO	16
2. REFERENCIAL TEÓRICO	17
2.1. INTRODUÇÃO À ANTENAS	17
2.2. ANTENA DE MICROFITA	18
2.2.1. Patch	19
2.2.2. Plano de Terra.....	20
2.2.3. Substrato	20
2.2.4. Parâmetros das Antenas.....	21
2.2.5. Métodos de alimentação das antenas de microfita	23
2.3. ANTENA DE MICROFITA COM O <i>PATCH</i> ELÍPTICO	23
2.3.1. Estado da arte.....	24
2.4. ANTENA BIOINSPIRADA	26
2.4.1. Estado da arte.....	26
2.4.2. <i>Tabebuia aurea</i>	28
3. METODOLOGIA.....	30
3.1. RELAÇÕES DE FREQUÊNCIA.....	31
3.2. DIMENSIONAMENTO DAS ANTENAS	35
4. RESULTADOS	38
4.1. DIMENSIONAMENTO DAS ANTENAS DE MICROFITA.....	38
4.2. CONSTRUÇÃO DAS ANTENAS NO <i>SOFTWARE</i> HFSS.....	39
4.3. SIMULAÇÃO E RESULTADOS	41
4.3.1. Perda de retorno (S_{11}).....	41
4.3.2. VSWR.....	44
4.3.3. Carte de Smith	47
4.3.4. Diagramas de radiação 2D e 3D	49
5. CONCLUSÃO.....	54
6. REFERÊNCIAS	55

1. INTRODUÇÃO

Com os avanços tecnológicos, os dispositivos eletrônicos têm aumentado a capacidade de se comunicar entre si. Uma forma bastante utilizada para tais fins é a comunicação *Wireless* (redes sem fio), que proporciona em alguns casos interações de sistemas com mobilidade e ampla transmissão de dados, entre outros fatores (MEDEIROS, 2013).

A comunicação entre dispositivos tem em sua maioria, a utilização de antenas para sua transmissão e recepção de dados. Dentre os vários tipos de antenas, descrito na literatura, uma em particular, se destaca, a antena de microfita. As antenas de microfita são estruturas planares em que são amplamente utilizadas, devido as suas características estruturais como: tamanho compacto e peso reduzido, fácil adaptação a vários tipos de superfícies na forma planar ou não planar, fácil fabricação e montagem, boa resistência mecânica, assim como, suas propriedades eletromagnéticas (MEDEIROS, 2013).

Diante dos diversos estudos em antenas de microfita e com a intenção de utilizar diferentes formas de *patch* para este trabalho utilizou-se estruturas elípticas e bioinspiradas. Na área de telecomunicações as estruturas baseadas em folhas se dão pela capacidade de absolver radiação solar. Bem como, a inspiração vem da evolução de adaptação das plantas para sobrevivência em determinados ambientes. Assim, inúmeras formas e modelos bioinspiradas de antenas, filtros entre outros dispositivos são estudados na literatura (JÚNIOR, 2015).

A geometria de folhas de plantas é um dos objetos de estudo desse trabalho, escolhendo então a *Tabebuia aurea* (Caraibeira), uma planta do cerrado bem adaptada a seca do nordeste brasileiro.

Por apresentar semelhança com os formatos da folha escolhida, são utilizados *patches* de geometria elíptica no desenvolvimento do trabalho, esse formato é utilizado em diversos trabalhos com aplicações em Banda Ultra Larga (*Ultra Wideband* - UWB). O sistema UWB tem como característica principal uma grande largura de banda com diversas frequências de operação com bom desempenho (NÓBREGA, 2008).

As antenas de microfita bioinspiradas apresentam papel fundamental na inovação dos modelos de *patch*, e das estruturas de antenas, trazendo com isso, novas aplicações em UWB.

1.1. MOTIVAÇÃO

A motivação para este trabalho de antenas de microfita bioinspiradas é baseado na folha da planta Caraibeira (*Tabebuia aurea*), encontrada em grande número no município de Caraúbas-RN, Brasil. As suas folhas serviram de modelo para o formato do *patch* da antena. Esta escolha se deve ao princípio de que, a forma geométrica das folhas proporciona maior absorção de radiação solar com a dificuldade no desenvolvimento dos detalhes existentes nas folhas da caraibieira e a sua semelhança com a forma elíptica, esta foi utilizada no estudo dos parâmetros das antenas, que são simuladas no software comercial.

1.2. OBJETIVO

Desenvolver um estudo de antena de microfita com patch bioinspirado na folha da Caraibeira e analisar de forma comparativa com antena de microfita com geometria de patch elíptico, para aplicação em banda ultra larga (UWB). Analisando os parâmetros: perda de retorno (S1.1), VSWR, carta de Smith e diagramas de radiação 2D e 3D.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. INTRODUÇÃO À ANTENAS

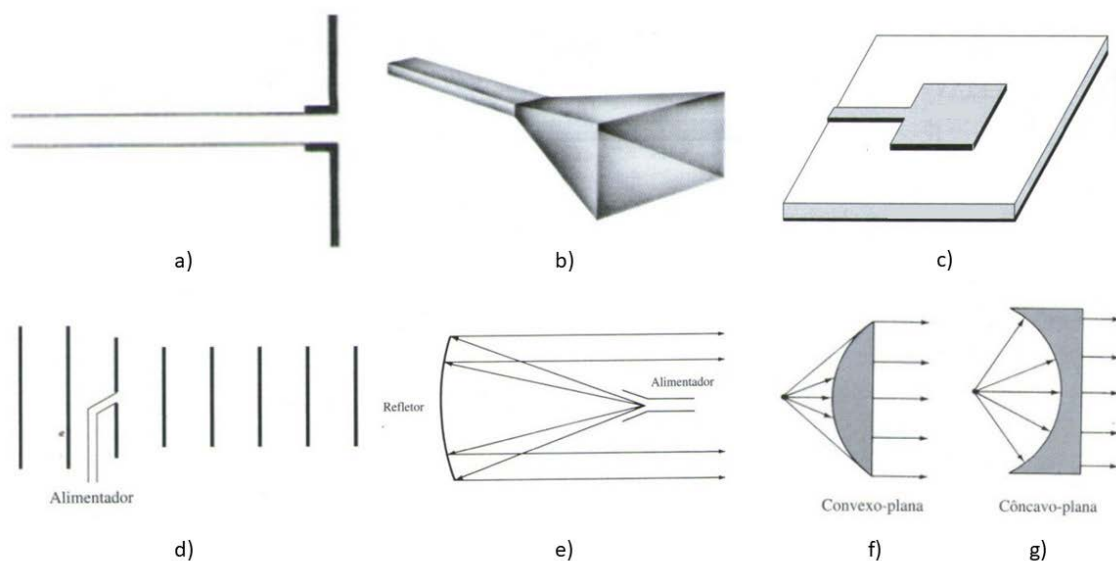
A ampla utilização de dispositivo eletrônicos na telecomunicação usa em sua maioria tecnologia de sistemas sem fio, sendo necessário a aplicação de antenas, que são dispositivos que fornecem e/ou recebem sinais de ondas eletromagnética guiadas em um meio livre (RIOS; PERRI, 2002).

Por volta de 1870 o físico e matemático escocês James Clerk Maxwell, descreveu as definições e equações de ondas eletromagnéticas. Trazendo assim, uma enorme evolução no meio científico da época, iniciando os estudos das formas de transmitir e receber as ondas eletromagnéticas no meio livre (CARNEIRO, 2010).

Entre os diversos tipos de antenas, destacam-se algumas como: antenas filamentosas, antenas de abertura, antenas de microfita, conjuntos de antenas, antenas refletoras e antenas lentes. Na Figura 1, é mostrado alguns modelos de cada tipo de antena comentado anteriormente. Em (a) pode-se observar uma antena dipolo simples e bastante utilizada em uso geral. A antena mostrada em (b), é antena de abertura no formato corneta piramidal, muito utilizada na aeronáutica. Em (c), demonstra a antena de microfita com *patch* retangular, com diversas aplicações abordadas neste trabalho.

O conjunto mostrado em (d), represente um formato de antena Yangi-Uda onde é bastante utilizado em sistemas que necessite grande diretividade e ganho considerável, assim aplicando diversas antenas com propriedades específicas para diversos casos. Em (e) observa-se o modelo refletor parabólico que sua maior utilização é em transição de dados para longas distâncias. E em (f e g), mostra lentes utilizadas para emitir sinais em direções específicas (BALANIS, 2005).

Figura 1: Modelos de antenas a) Dipolo b) Corneta piramidal c) Antena de microfita retangular d) Conjunto Yangi-Uda e) Refletor parabólico com alimentador frontal f) Lente com índice de refração maior do que um g) Lente com índice de refração menor do que um.



Fonte: Adaptado BALANIS, 2005.

2.2. ANTENA DE MICROFITA

Diante dos diversos tipos de antenas existentes na literatura e suas respectivas aplicações, as antenas de microfita se destacam por apresentar formas planar ou não-planar, uma grande maleabilidade em relação a suas propriedades de tipos de materiais utilizados na sua construção, possibilitando uma enorme variedade de formas e geometrias do desenho do *patch* (BALANIS, 2005).

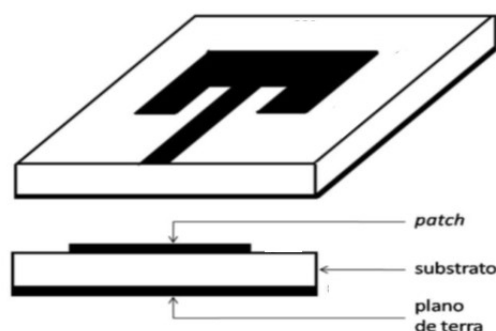
Apresentando também peso e tamanho reduzido, fácil fabricação e montagem, fácil adaptação a vários tipos de superfícies planares e não planares, boa robustez mecânica, versáteis em diversas frequência de ressonância, polarização, padrão de radiação e impedância de entrada (BALANIS, 2005). Com essas propriedades estruturais existe uma vasta aplicação em satélites, veículos espaciais, na área militar e muitas outras áreas de sistema de comunicação *Wireless* (MEDEIROS, 2012).

As vantagens da utilização das antenas de microfita estão na variedade de modelos e formatos na sua construção. Diversos tipos de materiais podem ser utilizados como substrato ou nas placas condutoras. Assim como, são várias as formas para casamento de impedância da antena (MEDEIROS, 2013).

As desvantagens vêm por motivo de ela não ter uma boa eficiência, existência de ondas de superfícies, largura de banda estreita, baixo ganho, entre outros (BALANIS, 2005).

As antenas de microfita são basicamente constituídas de duas finas camadas de condutor separadas por um material dielétrico. Na sua fabricação pode ser usada técnicas de circuito impresso (BALANIS, 2005). A Figura 2 ilustra, uma estrutura básica de uma antena de microfita destacando na camada superior um *patch* metálico, no inferior um plano de terra também metálico e no meio um substrato dielétrico. Cada uma destas camadas são descritas a seguir.

Figura 2: Estrutura básica de uma antena de microfita.

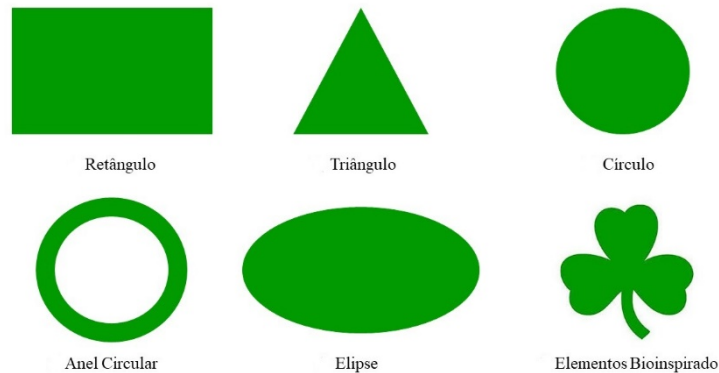


Fonte: Adaptado BARROS, 2012.

2.2.1. Patch

A lâmina superior da antena de microfita é chamada de *patch*, é constituída de um material com boa condutividade. O formato do *patch* influencia na distribuição da corrente, e consequentemente nos campos elétricos e magnéticos da superfície (BALANIS, 2005).

Podendo aplicar inúmeros formatos geométricos simples como: retangular, triangular, círculo, anel entre outros, também pode ser aplicado geometrias complexas como formas fractais, a utilização de estruturas bioinspiradas, que possibilitam o estudo de novos modelos e desempenho para determinados sistemas de comunicação. São várias também as técnicas para dimensionar estas geometrias (SILVA, 2017). A Figura 3 abaixo, mostra algumas das possíveis formas de *patch* metálicos.

Figura 3: Modelos de *Patch*.

Fonte: Autoria própria.

2.2.2. Plano de Terra

A lâmina inferior é chamada de plano de terra, analogamente ao *patch* é formada de uma fina camada de um material condutor. Onde, a finalidade do plano de terra é atuar como um mecanismo refletor, para impedir que as ondas se propagarem na direção contrária da projetada (MEDEIROS, 2013).

Dessa forma o plano de terra juntamente com o *patch*, moldam o diagrama de radiação da antena (LACERDA; SANTOS JUNIOR, 2008). Na teoria, considera-se o plano de terra como sendo um condutor infinito, utiliza-se esse método para facilitar os cálculos e considerações de contorno da antena (HOLANDA, 2015).

A utilização de plano de terra truncado, modifica a forma com que os campos eletromagnéticos se distribuem. Este método é uma forma aplicada para obter uma melhoria também na largura de banda, e como consequência o aumento das ondas superficiais (HOLANDA, 2015).

2.2.3. Substrato

O substrato é constituído de materiais dielétricos, onde separa o *patch* do plano de terra. A determinação do material do substrato depende da altura e da sua permissividade elétrica. Uma característica importante da altura (h) é que sua contribuição na propagação das ondas de superfície (MAIA, 2016). Alguns estudos são desenvolvidos utilizando mais de um dielétrico como substrato com proposito de melhoria da sua largura de banda (BALANIS, 2005).

2.2.4. Parâmetros das Antenas

No estudo das antenas é necessário priorizar alguns parâmetros considerados fundamentais que são: diagrama de radiação, diretividade, eficiência, ganho, perda de retorno (S1.1), largura de banda (LB), polarização, entre outros. Com esses parâmetros pode-se diferenciar inúmeros tipos de antenas e seus respectivos arranjos. Onde na construção de uma antena procura-se priorizar, alguns parâmetros específicos dependendo da aplicação (RIOS; PERRI, 2002).

O diagrama de radiação, apresenta o ganho que demonstra o comportamento das ondas eletromagnéticas na antena em relação as suas coordenadas espaciais. Esse diagrama pode ser desenvolvido na forma tridimensional ou bidimensional, mostrando a amplitude do campo elétrico, do campo magnéticos e da potência radiada (BALANIS, 2005).

A diretividade da antena demonstra a capacidade da antena em se concentrar em uma determinada direção, ou seja, é resposta mediada da direção do foco do lóbulo principal da antena. A eficiência é a relação de perdas em comparação com uma antena isotrópica (sem perdas). (BALANIS, 2005).

O ganho de potência é um parâmetro que está diretamente relacionado com a diretividade e a eficiência. Este parâmetro mede a potência irradiada que a antena envia em uma direção, em comparação com uma antena isotrópica (BALANIS, 2005).

O principal parâmetro, de acordo com a literatura, é a perda de retorno (S1.1), está relaciona tensão e corrente para medir as diferenças ocorridas na linha de alimentação da antena. Existem diversas formas de calcular esse parâmetro, o mais comum é utilizando os parâmetros S da matriz de espalhamento, que estuda as relações da linha de transmissão com a antena utilizando um quadripolo, relacionado tensões e correntes que entram e saem da linha para então determinar suas perdas em decibéis (dB) (BALANIS, 2005).

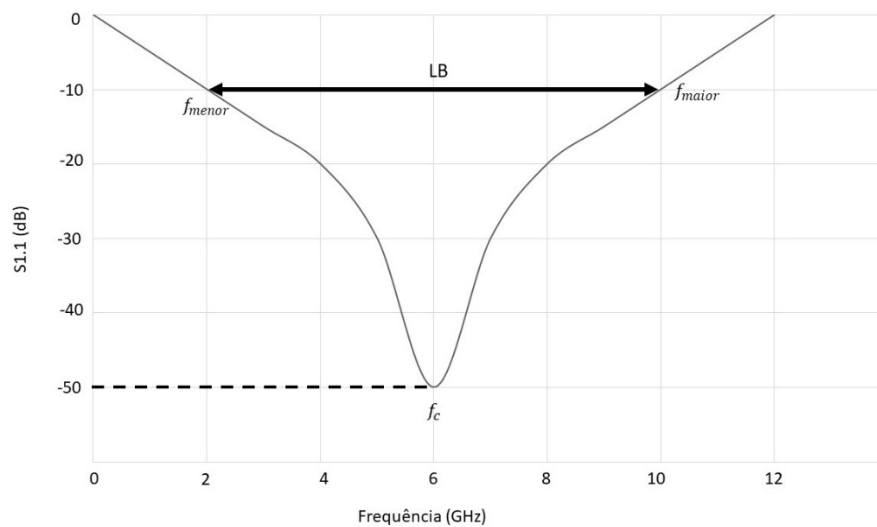
Por fim, o parâmetro largura de banda, esta é a faixa de frequência de atuação da antena em relação a sua frequência central (HOLANDA, 2015). Esse parâmetro pode ser considerado de duas formas, banda estreita e banda larga. Onde a LB estreita tem pelo menos 10% da frequência de central, e a LB larga tem de 10% a 50% da frequência de central (MAIA, 2016).

Existe na literatura diversas equações que calculam este parâmetro. Neste trabalho utiliza-se a relação da frequência inferior e superior como mostrado na Equação 1 (BALANIS, 2005).

$$LB = f_{maior} - f_{menor} \quad (1)$$

A Figura 4 representa o gráfico de perda de retorno, com os parâmetros descritos anteriormente, f_{menor} e f_{maior} são as frequências de atuação no ponto de -10dB, f_c é a frequência central com melhor perda de retorno, LB é a largura de banda.

Figura 4: Gráfico da perda de retorno pela frequência.



Fonte: Autoria própria.

A faixa de frequência da Banda Ultra Larga (*Ultra Wideband* - UWB), de 3,1 GHz a 10,6 GHz. Essa faixa de frequência foi estabelecida pela Comissão Federal de Comunicação (*Federal Communication Commission* - FCC), buscando impedir interferências com outras faixas de operação como por exemplo os satélites de GPS que vai de 1,1 GHz a 1,5 GHz. O UWB proporciona uma elevada taxa de transmissão de dados em diferentes frequências (NÓBREGA, 2008).

O parâmetro de Taxa de Onda Permanente de Voltagem (*Voltage Standing Wave Ratio* - VSWR), demonstra a analogia das amplitudes máxima e mínima de voltagem. Onde em casos ideais o valor aproxima-se de um. Na aplicação em UWB, necessita-se que na faixa de frequência de 3,1 a 10,6 GHz o seu gráfico de VSWR permaneça abaixo de 2 (ARAÚJO, 2017).

2.2.5. Métodos de alimentação das antenas de microfita

Para radiação da antena é necessário ser alimentada por uma diferença de potencial. Há vários métodos para promover a alimentação da antena de microfita, em destaque estão: o método de linha de microfita, alimentação por cabo coaxial, excitação por acoplamento por abertura e acoplamento por proximidade. A Tabela 1 abaixo, mostra a eficiência de cada um desses modelos.

Tabela 1: Relação de cada tipo de alimentação de antena de microfita.

Características	Linha de Microfita	Cabo coaxial	Acoplamento por Abertura	Acoplamento por proximidade
Espúrios de radiação	Maior	Maior	Menor	Médio
Pureza de Polarização	Pobre	Pobre	Excelente	Pobre
Fabricação	Fácil	Fácil	Difícil	Difícil
Casamento de impedância	Fácil	Fácil	Fácil	Fácil
Largura de banda	2-5%	2-5%	21%	13%

Fonte: Adaptado de BAHLE e BHARTIA, 2001.

Entre todos esses modelos de alimentação, a mais utilizada é a linha de microfita por ser a mais simples de ser projetada, ter uma fabricação simples e apresenta bom desempenho em diversos formatos de *patch*. Esse método de alimentação consiste em uma linha disposta no *patch* sobre o substrato (GARG et al., 2001). As suas dimensões são calculadas de forma simples, em comparação aos outros métodos.

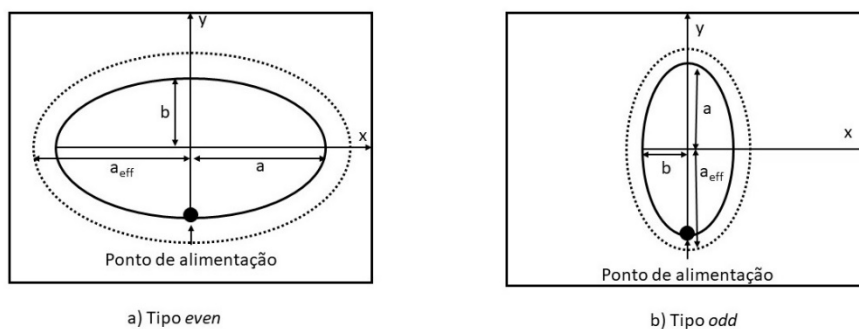
2.3. ANTENA DE MICROFITA COM O *PATCH* ELÍPTICO

Devido a antena de microfita com *patch* retangular ter deficiência na largura de banda, outros formatos de antena de microfita são temas de trabalhos na área. Buscando melhorar esse desempenho, muitas soluções são estudadas, a utilização de *patch* no formato é uma destas (DESHMUKH et al., 2015).

A utilização dessa geometria é devido à maior capacidade de atuar em várias aplicações de antenas de baixo perfil, com maior flexibilidade no design, apresentando também maior largura de banda na faixa de GHz, em comparação com outras antenas de microfita. As antenas com o *patch* elíptico têm melhor perda de retorno, boa diretividade e padrão de radiação (PINGALE et al., 2015).

Um importante parâmetro do modelo de Antena de Microfita Elíptico (*Elliptical Microstrip Antenna* - EMAs) é a utilização de propriedades matemáticas complexas como a Função Modificada de Mathieu (ARAÚJO, 2017). Nesse método é necessário determinar alguns fatores iniciais como material utilizado forma da alimentação e posicionamento do *patch*. A elipse pode ser alimentada de duas formas, dependendo da localização do semieixo maior (semieixo a) e do semieixo menor (semieixo b) de acordo com a figura apresentada a seguir. Dessa forma, pode-se determinar duas configurações: o tipo *even* (modelo par) em que, a parte maior da elipse está localizada na horizontal, e o modelo *odd* (modelo ímpar) onde, a parte maior da elipse está localizada na vertical como mostra a figura 5 (KUMPRASERT, 2000).

Figura 5: Tipos de *patch* elípticos.



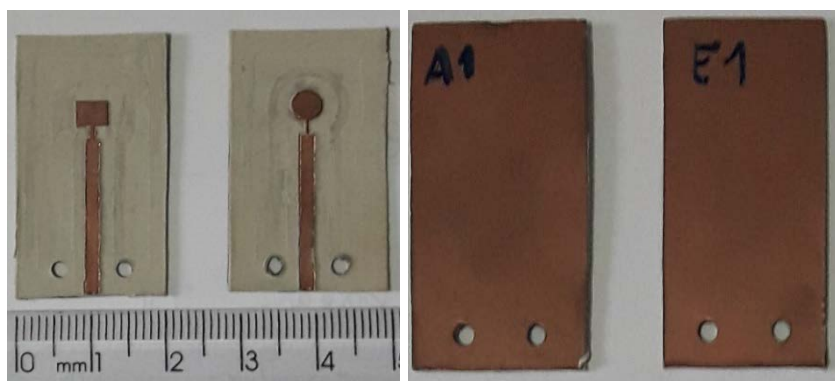
Fonte: autoria própria.

2.3.1. Estado da arte

Em Araújo (2017), desenvolve-se um estudo comparativo de duas antenas de microfita, uma com *patch* retangular e outra com *patch* elíptico como mostra a Figura 6. Para aplicação na quinta geração 5G e uma frequência central de 28 GHz. As antenas foram fabricadas no substrato de RT/Duroid 5880 LZ. Ambos os trabalhos tiveram bom desempenho nos resultados, para frequência de 28 GHz a antena com *patch* elíptico teve uma perda de retorno de -15,75

dB, já para a mesma frequência na antena com *patch* retangular teve a perda de retorno em -24,78 dB.

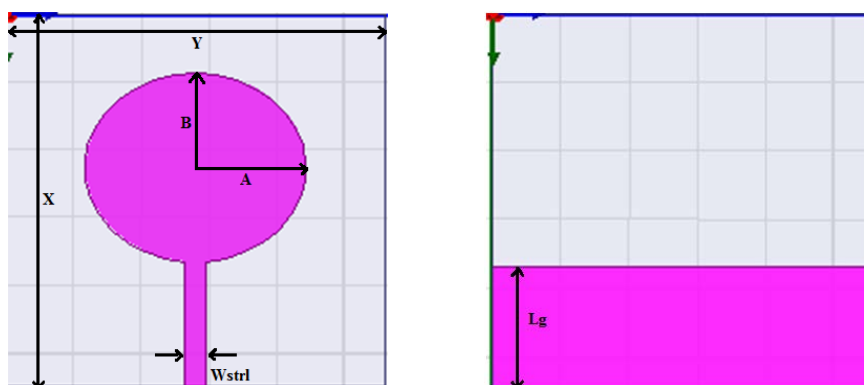
Figura 6: Antenas de microfita com *patch* retangular e *patch* elíptico.



Fonte: Araújo, 2017.

Em Pingale et al (2015), foi construído um dispositivo de microfita com *patch* elíptico como mostra a Figura 7. A antena foi fabricada para atuar na faixa de UWB. O formato da antena foi adaptado para aumentar a largura de banda, o material utilizado foi o FR4 com permissividade elétrica 4,4. Os resultados simulados e medidos foram conviventes como esperados, obtendo duas frequências de operações com baixa perda de retorno, uma com frequência de 2,33 GHz e perda de retorno em -25,26 dB, a segunda frequência foi de 6,73 GHz com perda de retorno em -25,50 dB.

Figura 7: Vista frontal e inferior da antena de microfita com *patch* elíptico.

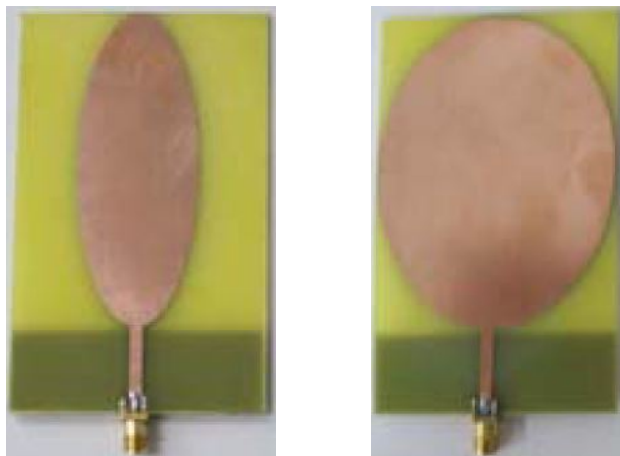


Fonte: Modificado Pingale et al, 2015.

Em Nóbrega (2008), o autor trabalhou de forma comparativa com duas antenas de *patches* diferentes. Um na geometria circular e outro no formato elíptico, como mostra a Figura

8. Foram construídas em substrato isotrópicos. A antena que apresentou o melhor resultado foi a antena com *patch* circular e com ranhuras no plano de terra.

Figura 8: Antena de microfita elíptica



Fonte: Adaptada Nóbrega 2008.

2.4. ANTENA BIOINSPIRADA

A natureza em sua imensa grandeza e diversidade, cada dia mais vem servindo de inspiração para estudos científicos em diversas áreas. Estudos de comportamentos dos seres vivos na área de biologia, proporcionam consequentemente o entendimento e a motivação de projetos científicos na área tecnológica (SERRES et al., 2017).

O termo bioinspirada remete, a inspiração de elementos vivos para aplicação em determinados propósitos científicos. Esse método é utilizado com frequência em bases de algoritmos genéticos, robótica, medicina e atualmente na área de telecomunicações.

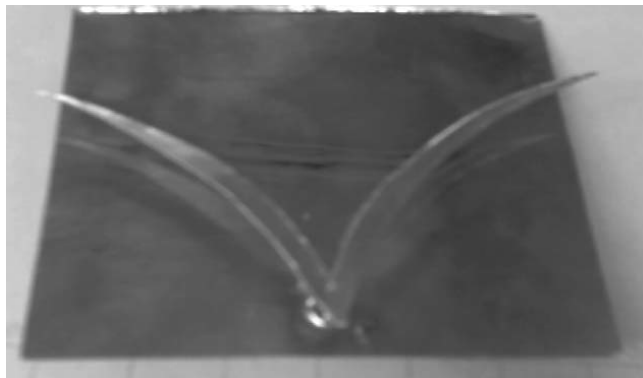
2.4.1. Estado da arte

O estudo de estruturas bioinspiradas na área de antenas, tem como proposito inovar os formatos de antenas já conhecidas procurando melhorar parâmetros específicos (DELGADO; MERA, 2013). Esses estudos têm bastante aplicações em antenas de microfita como é descrito em alguns trabalhos de estruturas bioinspiradas na literatura.

Em Mahmoud (2011), o trabalho desenvolveu uma estrutura de microfita com o *patch* inspirada nas antenas das baratas, como mostra a Figura 9. Como resultado para um substrato com permissividade elétrica de 4,5 obtiveram uma largura de banda percentual de cerca de

120%. Para o substrato de ar, a antena foi fabricada e a largura de banda foi de 42%. Por fim, os autores fizeram algumas modificações e obtiveram no substrato de ar um valor de 114%.

Figura 9: Antena de microfita bioinspirada nas antenas das baratas.



Fonte: Mahmoud, 2011.

Em Júnior, Silva e Silva (2015), foi desenvolvido um estudo comparativo de uma antena de microfita com *patch* inspirada formato da folha da cana-de-açúcar, como mostra a Figura 10. Uma antena de microfita com *patch* retangular. Com aplicação na faixa de operação da quarta geração 4G. Nos resultados a antena bioinspiradas ficou com resultado que mais se aproximou da faixa do 4G.

Figura 10: Antena de microfita bioinspirada na folha da cana-de-açúcar.



Fonte: Júnior, Silva e Silva, 2015.

Em Moura et al (2015), é projetado uma estrutura de microfita com *patch* na geometria da folha do algodão, como mostra a Figura 11. A antena foi projetada para aplicação em UWB, os resultados mostram que a estrutura bioinspirada, teve a largura de banda de 10 GHz, de 3 GHz a 13 GHz. Com isso os resultados podem ser aplicados em sistemas UWB.

Figura 11: Antena de microfita bioinspirada na folha do algodão.



Fonte: Moura et al, 2015.

A concordância da utilização das geometrias das folhas em diversos trabalhos, ocorre, pois, estas têm a capacidade natural de absorver a radiação solar para fazer o seu processo de fotossíntese, de forma análoga podem-se empregar os campos elétricos e magnéticos nessas estruturas e analisar suas respostas (SILVA JÚNIOR, 2015).

Como visto nos exemplos anterior, cada formato é usado em uma situação diferente de onde, a construção da antena bioinspirada depende principalmente do seu formato, para em seguida aplicar alguns métodos para melhorar os parâmetros e por fim projetar para alguns sistemas em faixas de frequências específicas (SILVA JÚNIOR, 2015).

4.2.2. *Tabebuia aurea*

Pelo fato do Brasil ter uma grande extensão territorial, a sua flora é bastante rica. Diversas plantas desenvolvem a capacidade de sobreviver em diferentes regiões de clima distintos, essa habilidade faz com que as arvores fiquem mais fortes e adaptadas ao ambiente em todo território. Como por exemplo, a família das *tabebuias* (ipês) que são arvores encontradas e adaptadas em diversas regiões do Brasil.

O município de Caraúbas localizado no interior do estado do Rio Grande do Norte - Brasil, recebe esse nome em homenagem a arvore bastante encontrada na região central da

cidade. A *tabebuia aurea* é conhecida por diversos sinônimos, como, Caraiba/caraibeira ou Carauba/caraubeira, dependendo da região do país. Esta árvore que pode chegar a 15 metros de altura, com uma coroa arredondada (folhagens acima do tronco) como mostra a Figura 12. As suas flores são bastante chamativas com uma coloração amarela e comprimento médio de 8 centímetros. Os seus frutos são capsulas de sementes com largura média de 1,5 a 2,5 centímetros, e comprimento aproximado de 8 a 15 centímetros (MUSEU DE HISTÓRIA NATURAL, 2011).

Figura 12: Caraibeira a) Vista frontal da caraibeira b) Flor da caraibeira c) Fruto da caraibeira.



a) Vista frontal da caraibeira



b) Flor da caraibeira



c) Fruto da caraibeira

Fonte: Museu de História Natural, 2011.

As folhas em especial têm o formato elíptico coriáceos, com o ápice arredondado na extremidade, largura estreita e base arredondada. Com comprimento médio de 5 a 15 centímetros, e largura média de 2 a 7 centímetros (MUSEU DE HISTÓRIA NATURAL, 2011).

3. METODOLOGIA

O trabalho em questão estuda o desempenho de dois modelos de *patches* de antenas de microfita. O contorno elíptico (com excentricidade próxima de um) é semelhante ao modelo de *patch* bioinspirado no formato da folha da Caraibeira.

A estrutura será desenvolvida no substrato de FR4 com permissividade elétrica de 4,4, altura de 1,56 milímetros. O *patch* é construído de cobre, no *software* de simulação é utilizado o material Condutor Perfeitamente Elétrico (*Perfect Electric Conductor* - PEC). Para o plano de terra é utilizado material semelhante ao *patch*, e empregado técnica de truncamento, com intuito de melhorar a largura de banda.

Inicialmente procurou-se determinar as dimensões do *patch*, onde são utilizadas as médias dos valores determinados na literatura de Museu de História Natural (2011). As dimensões dos eixos são calculados como mostra a Equação 2.

$$eixo = \frac{D_{menor} + D_{maior}}{2} \quad (2)$$

Com isso, foi determinado os dois valores médios dos eixos, onde o comprimento é 10 centímetros e largura igual a 4,5 centímetros. Assim utilizou-se uma folha retirada da árvore Caraibeira encontrada na cidade de Caraúbas/RN, com dimensões próximas das médias anteriormente citadas, a folha modelo do trabalho é mostrada na Figura 13.

Figura 13: Folha da caraibeira utilizada como modelo para o trabalho.



Fonte: autoria própria.

A folha mostrada anteriormente servira de modelo para o *patch* da antena bioinspirada, com dimensões de 11,65 centímetro para o eixo maior e 4,4 centímetros para o eixo menor. Com as dimensões dos semieixos a e b da folha, foi determinado as dimensões do *patch* da antena elíptica.

Nesta seção será demonstrado as principais equações utilizadas no desenvolvimento do trabalho. Iniciando com as equações para calcular a frequência de projetos e em seguida as equações para o dimensionamento das antenas com o *patch* elíptico e o bioinspirado.

3.1. RELAÇÕES DE FREQUÊNCIA

Diante dos diversos estudos encontrados na literatura para diferentes equações de frequência, gerando valores de frequência bem diferentes umas das outras. Com isso são selecionados quatro casos com diferentes equações de frequência e com seus respectivos resultados mostrados na próxima seção.

No caso 1 se fundamenta na equação retirada de Araújo (2017), utilizou-se a frequência de projeto que vem de uma analogia com a frequência de atuação da antena de microfitas com *patch* circular encontrada em Balanis (2005). Com isso, a equação relaciona a velocidade da luz (c), a permissividade elétrica do substrato (ϵ_r) e o semieixo maior da elipse (a), assim chega-se a equação da frequência de projeto do caso 1 como mostra a Equação 3.

$$f_{p1} = \frac{0,275c}{a\sqrt{\epsilon_r}} \quad (3)$$

Para o caso 2, foi utilizado as equações retirada de Kumprasert (2000), onde inicialmente determina a excentricidade da elipse que, é uma relação com os dois semieixos, que pode ser determinada pela Equação 4.

$$e = \sqrt{1 - \left(\frac{b}{a}\right)^2} \quad (4)$$

Em seguida calcula-se a relação da função de Mathieu aproximada para o modo dominante TM_{11} , que pode ser encontrada de duas formas. A Equação 5 é para o modelo par (*even*), e a Equação 6 é para o modelo ímpar (*odd*), como mostra na Figura 4 (KUMPRASERT, 2000).

$$q_{11}^e = -0,0049e + 3,7888e^2 - 0,7278e^3 + 2,314e^4 \quad (5)$$

$$q_{11}^o = -0,0063e + 3,8316e^2 - 1,1351e^3 + 5,2229e^4 \quad (6)$$

Uma propriedade que se leva em consideração é o efeito de borda no condutor ou efeito de franjamento, onde implica que, uma pequena parte dos campos ultrapasse os limites da fita condutora, apresentando assim um tamanho elétrico aumentado. Dessa forma, calcula-se o semieixo efetivo que é uma relação com o semieixo maior, a altura e a constante dielétrica do substrato, onde $a_{eff} > a$. Assim, determina-se a Equação 7 (KUMPRASERT, 2000). Uma observação importante é que os valores dos semieixos nestas equações têm que estar em centímetros.

$$a_{eff} = a \left[1 + \left(\frac{2h}{a\pi\epsilon_r} \right) \left\{ \ln \left(\frac{a}{2h} \right) + (1,41\epsilon_r + 1,77) + \frac{h}{a} (0,268\epsilon_r + 1,65) \right\} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

Com isso, chega-se a Equação 8, que é a frequência de modo dominante TM_{11} (KUMPRASERT, 2000).

$$f_{11} = \frac{15}{\pi e a_{eff}} \sqrt{\frac{q_{11}^{e,o}}{\epsilon_r}} \quad (8)$$

Para calcular a frequência de projeto do caso 2, utiliza-se a Equação 9.

$$f_{p2} = \frac{15}{\pi e a} \sqrt{\frac{q_{11}^{e,o}}{\epsilon_r}} \quad (9)$$

No caso 3, foram utilizadas as equações de Ray (2008), onde inicialmente escolhe-se o modelo da antena que pode ser os modelos *even* e *odd*. Com isso chega-se as Equações 10 e 11 para o modelo *even*.

$$L = 2b \quad (10)$$

$$r = \frac{a}{4} \quad (11)$$

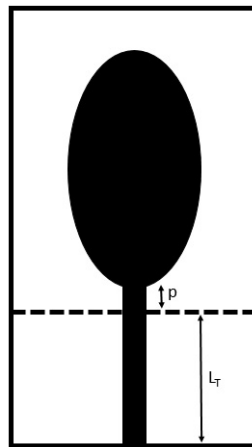
Para o modelo *odd*, chega-se as equações 12 e 13,

$$L = 2a \quad (12)$$

$$r = \frac{b}{4} \quad (13)$$

Em seguida calcula-se o parâmetro p , que é definido por Ray (2008) como a distância entre o extremo da elipse até o plano de terra, e sua finalidade é auxiliar no truncamento do plano de terra e com o casamento de impedância, como mostra a Figura 14.

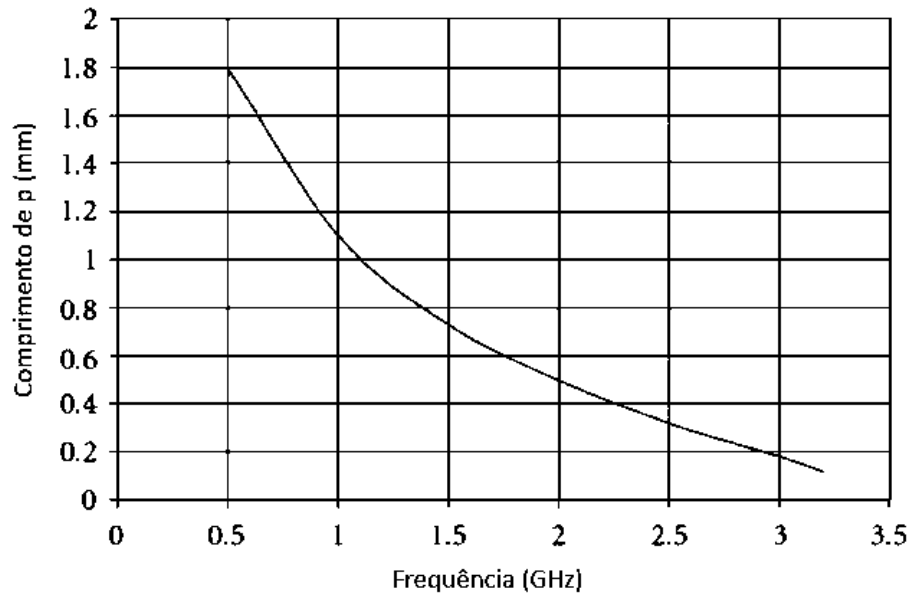
Figura 14: Distancia p na vista superior da antena.



Fonte: Autoria própria.

A relação do p com a frequência para antenas elípticas com a aplicação principalmente em UWB é ilustrado na Figura 15. O gráfico mostra a curva onde os valores de frequência e comprimento de p , tiveram os melhores resultados com relação ao casamento de impedância (RAY, 2008).

Figura 15: Variação do comprimento de p com a frequência.



Fonte: Ray, 2008.

A partir da relação da frequência com a distância p exposta anteriormente, foi desenvolvido a equação para calcular o p, já em milímetros, observa-se na Equação 14.

$$p = -0,912 \ln(f_c) + 1,1311 \quad (14)$$

Para calcular a permissividade efetiva do substrato foi utilizado a Equação 15. Onde o k é uma relação com o ϵ_{eff} como representa a Equação 16. Logo, é utilizado um valor intrínseco aproximado do valor calculado para o material FR4 com permissividade elétrica de 4,4. Assim utiliza-se o k igual a 1,15 (PINGALE et al, 2015).

$$\epsilon_{eff} \approx \frac{\epsilon_r + 1}{2} \quad (15)$$

$$k = \sqrt{\epsilon_{eff}} \quad (16)$$

Com isso chega-se a equação para calcular a frequência de projeto do caso 3, como observa-se a Equação 17.

$$f_{p3} = \frac{7,2 \cdot 10^9}{(L+r+p)k} \quad (17)$$

No caso 4, é utilizado a literatura de Cruz et al. (2017), onde necessita calcular o perímetro do *patch*. No caso da elipse é utilizada a Equação 18.

$$P_{\text{perímetro}} = 2\pi \sqrt{\frac{a^2 + b^2}{2}} \quad (18)$$

Com isso formula-se a equação para a frequência de projeto do caso 4, como mostra a Equação 19.

$$f_{p4} = \frac{300}{P_{\text{perímetro}} \sqrt{\epsilon_{\text{eff}}}} = \frac{300}{P_{\text{perímetro}} K} \quad (19)$$

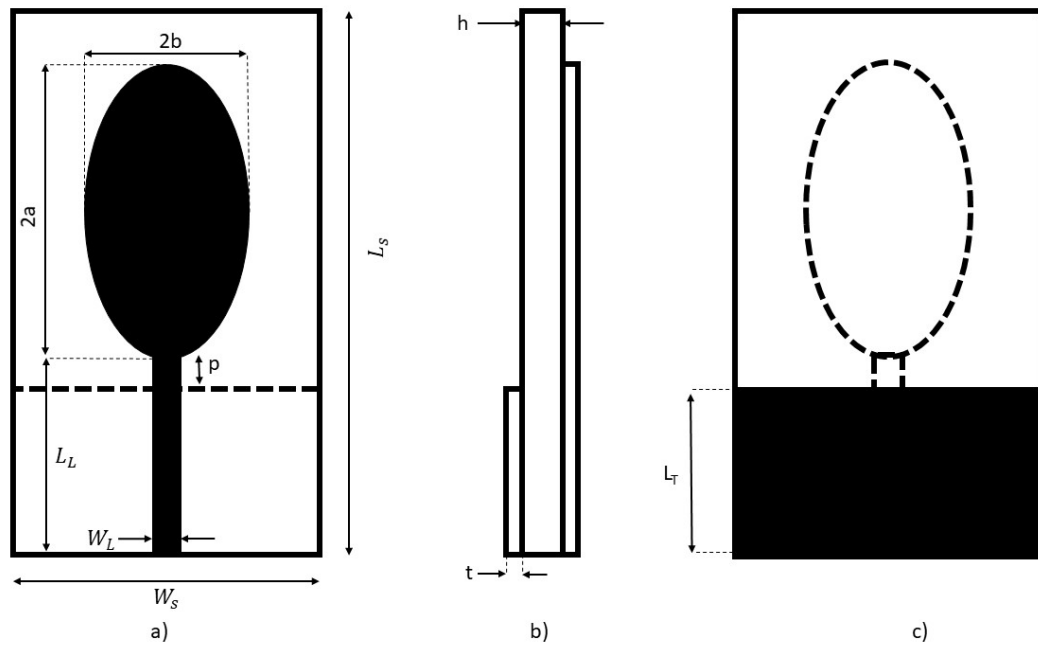
3.2. DIMENSIONAMENTO DAS ANTENAS

Neste tópico são calculadas as dimensões necessárias para a construção das antenas de microfitas com o plano de terra truncado.

As distâncias a e b são os semieixos do *patch*, o p é a distância da extremidade do *patch* com o plano de terra. A dimensão L_L e W_L são os tamanhos da linha de alimentação, onde o W_L está dimensionado para uma impedância de entrada de 50Ω . As distâncias L_S e W_S são respectivamente o comprimento e a largura do substrato, as dimensões mostradas na vista lateral são h e t que representa respectivamente a altura do substrato e a altura da camada de cobre. Na vista inferior encontra-se o L_T que é o comprimento do plano de terra.

A Figura 16, mostra a estrutura utilizada no trabalho, apresenta dimensões que serão utilizadas para a antena com *patch* elíptico e para a antena com o *patch* bioinspirado na folha da carabeira.

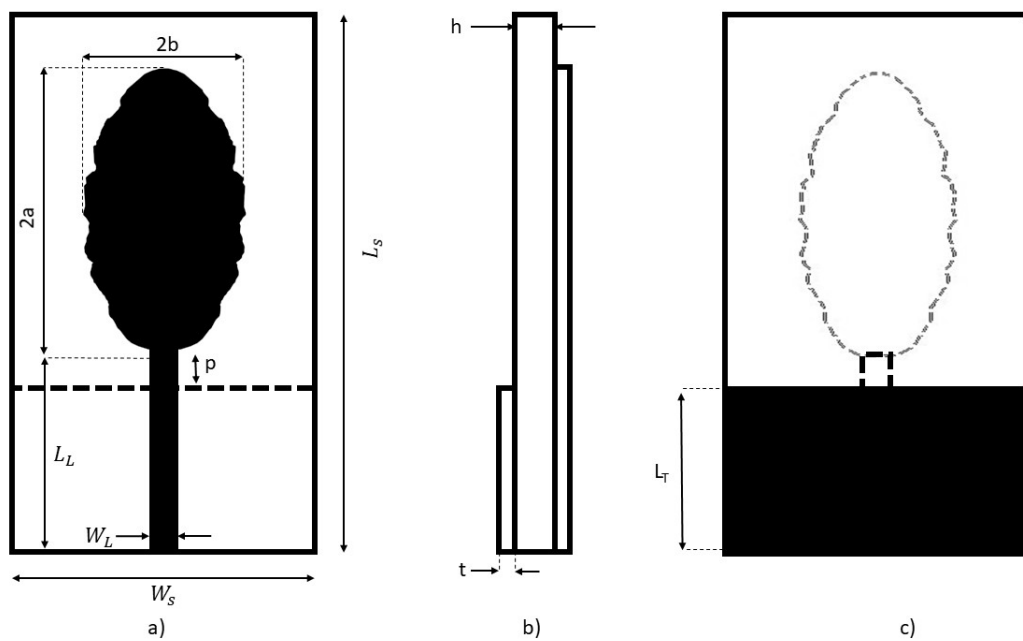
Figura 16: Antena elíptica com plano de terra trucado a) Vista superior b) vista lateral c) Vista inferior.



Fonte: autoria própria.

A Figura 17, demonstra o modelo da antena de microfita bioinspiradas na folha da carabeira, as suas dimensões são as mesmas mencionadas anteriormente.

Figura 17: Antena bioinspiradas na folha da carabeira com plano de terra trucado a) Vista superior b) vista lateral c) Vista inferior.



Fonte: autoria própria.

Para calcular a distância do plano de terra truncado foi utilizado a Equação 20, mostrada a seguir (PINGALE et al, 2015).

$$L_T = \frac{c}{4kf_p} \quad (20)$$

Para a alimentação é desenvolvido o método da linha de microfita, essa linha é uma analogia das impedâncias com a frequência da antena. Para calcular a largura da linha, considera-se que a impedância de entrada da antena seja padrão. Dessa forma chega-se a Equação 21 (PINGALE et al, 2015).

$$Z_0 = \frac{87}{\sqrt{\epsilon_r + 2,41}} \ln \left(\frac{5,98h}{0,8W_L + t} \right) \quad (21)$$

Em seguida, isolando o termo W_L que é a largura da linha chega-se a Equação 22.

$$W_L = 7,475h \left(e^{-\left(\frac{Z_0 \sqrt{\epsilon_r + 2,41}}{87} \right)} \right) - 1,25t \quad (22)$$

Para dimensionar a distância da linha, soma-se a distância do plano de terra truncado com a distância p , como mostra a Equação 23.

$$L_L = L_T + p \quad (23)$$

Para as dimensões do substrato, é considerado o seguinte método. Para o comprimento que o lado maior L_s utiliza-se a Equação 24, para a largura que é o lado menor W_s utiliza a Equação 25.

$$L_s = 2a + L_T + p + 6h \quad (24)$$

$$W_s = 2b + W_L + 6h \quad (25)$$

4. RESULTADOS

Com as equações demonstradas na seção anterior, juntamente com os valores das constantes para as antenas deste trabalho, indicadas na Tabela 2, foram calculadas as direções para cada caso.

Tabela 2: Parâmetros constantes das antenas de microfita do trabalho.

Parâmetro	Valores
ϵ_r	4,4
a	58,25 mm
b	22 mm
h	1,56 mm
t	0,005mm
Z_0	50 Ω

Fonte: Autoria própria.

Como já comentando anteriormente, o material do substrato vai ser de FR4 com permissividade elétrica de 4,4, altura de 1,56 milímetros e nos materiais condutores utilizado o PEC com espessura de 0,005 milímetros. Os valores dos semieixos a e b retirados da folha modelo, e a impedância de entrada igual a 50 Ω .

4.1. DIMENSIONAMENTO DAS ANTENAS DE MICROFITA

Para o caso 1, foi aplicado os valores constante de c, a e ϵ_r na Equação 3, para determinar a frequência de projeto.

No caso 2, foi utilizado a Equação 4 para encontrar a excentricidade da elipse, em seguida utilizou-se a Equação 6 para calcular a constante q_{11}^0 retirada da função aproximada de Mathieu. Com esses valores, foi aplicado na Equação 9 para determinar a frequência de projeto do caso 2.

Para o caso 3, inicia-se escolhendo o modelo de antena no formato *odd*, em seguida aplica-se os valores de a e b nas Equações 12 e 13 respectivamente, para determinar o valor do L e r. Com isso aplica-se o valor de k intrínseco para o substrato de FR4, em seguida efetuou-se o cálculo para gerar uma distância p correspondente a frequência de projeto utilizando as Equações 14 e 17.

No caso 4, necessita-se calcular inicialmente o perímetro do *patch* utilizando a Equação 18, em seguida aplica-se os valores do perímetro juntamente com o valor intrínseco de k para substrato de FR4 para e determina a frequência de projeto do caso 4, utilizando a Equação 19.

Em todos os casos foram utilizados os mesmos métodos para dimensionar as antenas. Para determinar o comprimento do plano de terra foi aplicada a Equação 20. Aplicou-se a Equação 14, para determinar a distância p , e em seguida, foi calculada a largura e o comprimento da linha com as Equações 22 e 23 respectivamente, com isso, foram empregadas as Equações 24 e 25 para dimensionar o comprimento e a largura do substrato, respectivamente. Dessa forma, encontrou-se os seguintes valores, mostrados na Tabela 3, para cada caso estudado.

Tabela 3: Dimensões das antenas.

Parâmetros (mm)	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4
Comprimento do plano de terra	96,7	62	127	69,2
Distância p	1,5	1,1	1,8	1,2
Comprimento da linha	98,2	63,1	128,8	70,4
Largura da linha	3	3	3	3
Comprimento do substrato	224	189	254,7	196,3
Largura do substrato	56,4	56,4	56,4	56,4

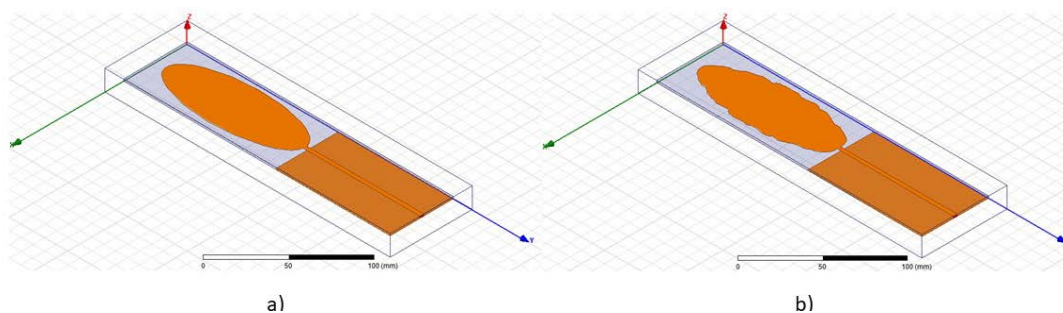
Fonte: Autoria própria.

Esses parâmetros foram utilizados para construção das antenas com *patches* elípticos e para antenas com *patches* bioinspirados, com intuito de comparar o desempenho entre ambas.

4.2. CONSTRUÇÃO DAS ANTENAS NO SOFTWARE HFSS

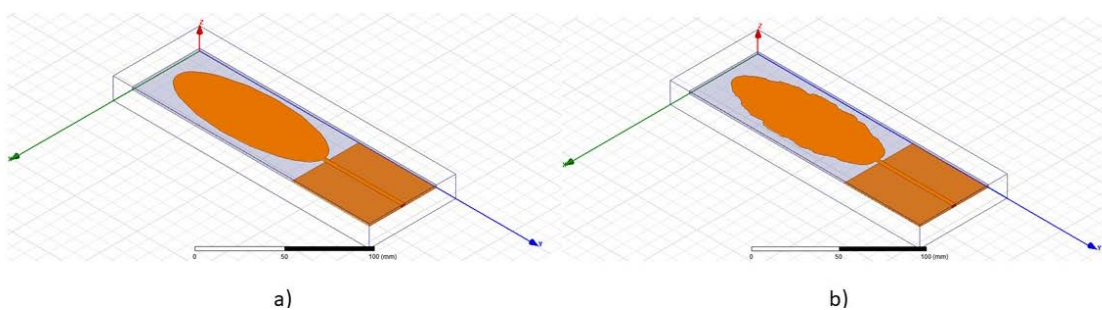
Com as dimensões já calculadas, são projetadas no software HFSS. As antenas com substrato de FR4 de permissividade elétrica de 4,4. O material do *patch* e do plano de terra foi utilizado o PEC. Esse método de construção foi aplicado para todos os casos estudados. As antenas para todos os casos foram projetadas utilizando-se os valores da Tabela 3, como mostram as Figuras 18, 19, 20 e 21 para os quatro casos, respectivamente.

Figura 18: Antenas do caso 1 a) Antena com *patch* elíptico b) Antena com *patch* bioinspirado.



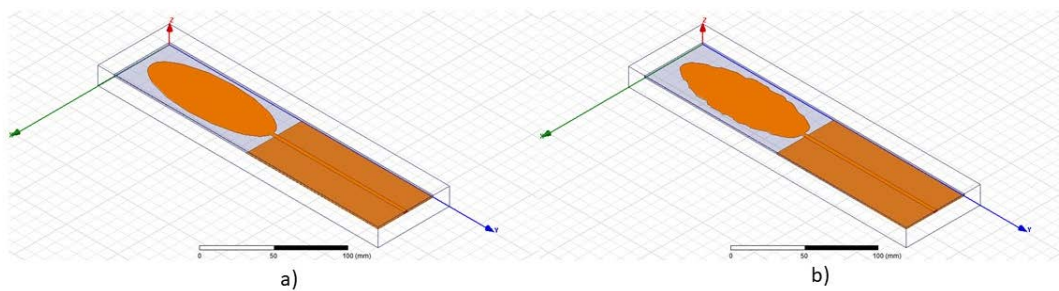
Fonte: Autoria própria.

Figura 19: Antenas do caso 2 a) Antena com *patch* elíptico b) Antena com *patch* bioinspirado.



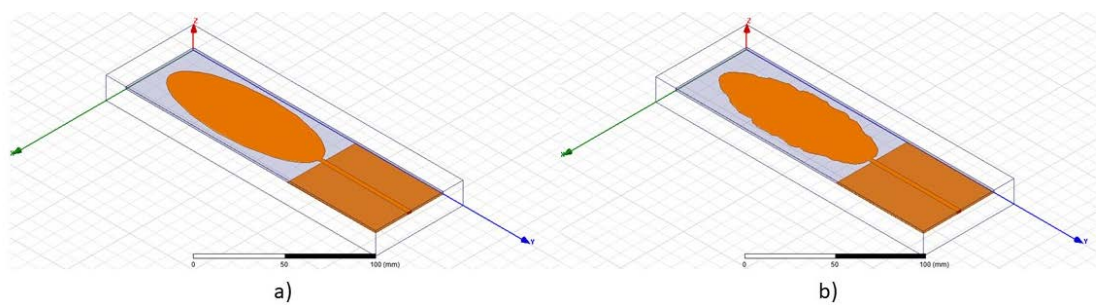
Fonte: Autoria própria.

Figura 20: Antenas do caso 3 a) Antena com *patch* elíptico b) Antena com *patch* bioinspirado.



Fonte: Autoria própria.

Figura 21: Antenas do caso 4 a) Antena com *patch* elíptico b) Antena com *patch* bioinspirado.



Fonte: Autoria própria.

4.3. SIMULAÇÃO E RESULTADOS

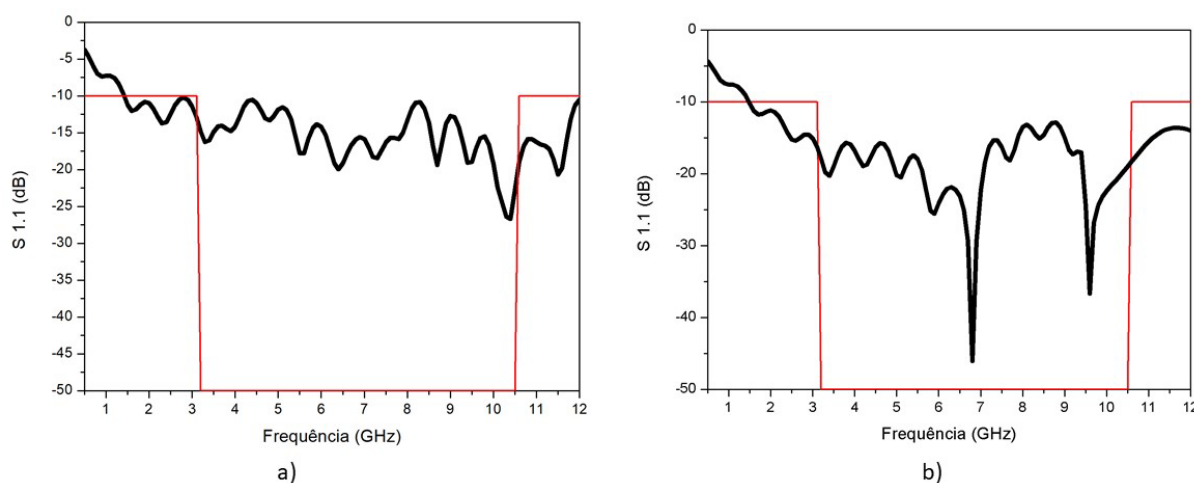
As antenas foram simuladas na faixa de frequência de 0,5 GHz até 12 GHz, para construção de resultados. Os parâmetros analisados no trabalho foram, a perda de retorno, o gráfico de VSWR, a carta de Smith e os diagramas de radiação 2D e 3D.

4.3.1. Perda de retorno (S1.1)

Para o caso 1, foram obtidos os seguintes resultados para a perda de retorno, analisando a Figura 22, para (a) a antena com *patch* elíptico atinge o -10 dB em 1,5 GHz. Na frequência inicial da UWB 3,1 GHz está com -12,91 dB e na final em 10,6 GHz está com -18,99 dB. Os principais picos de frequência foram de 6,4 GHz com -19,92 dB, em 8,7 GHz com -19,36 dB, em 9,4 GHz com -19,04 dB e em 10,4 GHz com -26,96 dB. Para (b) a antena com *patch* bioinspirado, obtém -10 dB também em 1,5 GHz. Onde na frequência de 3,1 GHz está com -16,21 dB e em 10,6 GHz com -18,26 dB. Com os principais picos em 6,8 GHz com -46,02 dB e em 9,8 GHz -24,37 dB.

Observa-se que em ambas as antenas funcionaram na faixa de frequência da UWB com vários modos de frequência. Porém, pode-se considerar que a antena com *patch* bioinspirado apresentou melhor desempenho, com melhores perdas de retorno nos picos de frequência.

Figura 22: Perda de retorno caso 1 a) *Patch* elítico b) *Patch* bioinspirado.



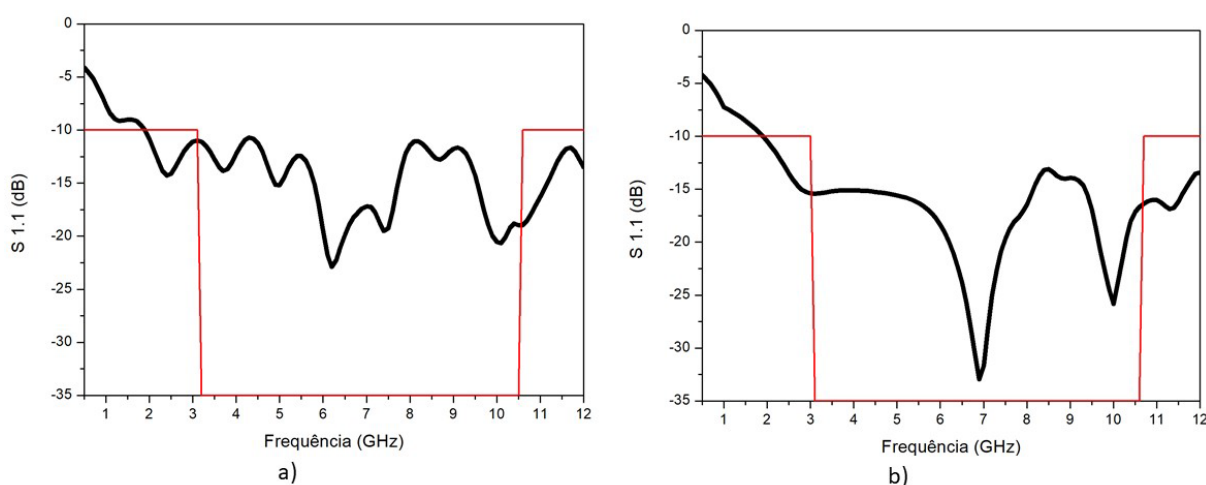
Fonte: Autoria própria.

No caso 2, foram obtidos os resultados mostrados na Figura 23. Onde, para (a) a antena com *patch* elíptico apresentou início da radiação em -10 dB na frequência de 1,9 GHz. Nas frequências de UWB apresentaram -10,97 dB para 3,1 GHz, e -18,96 dB para 10,6 GHz. Os

melhores picos foram em 6,2 GHz com -22,87 dB, em 7,4 GHz com -19,52 dB e em 10,1 GHz com -20,64 dB. Para (b) a antenna com *patch* bioinspirado obteve início da radiação em 2 GHz. Para as frequências de UWB em -15,41 dB para a menor e -16,66 dB para a maior. Os melhores picos de frequências foram em 6,9 GHz com -32,96 dB e em 10 GHz com -25,84 dB.

De maneira geral, as duas estruturas apresentaram bom comportamento, ambas atuaram em todo percurso de frequência do UWB em vários picos de frequência. Observando que novamente a antenna bioinspirada se sobrepõe a elíptica, com picos de frequências melhores para aplicação em UWB.

Figura 23: Perda de retorno caso 2 a) *Patch* elítico b) *Patch* bioinspirado.

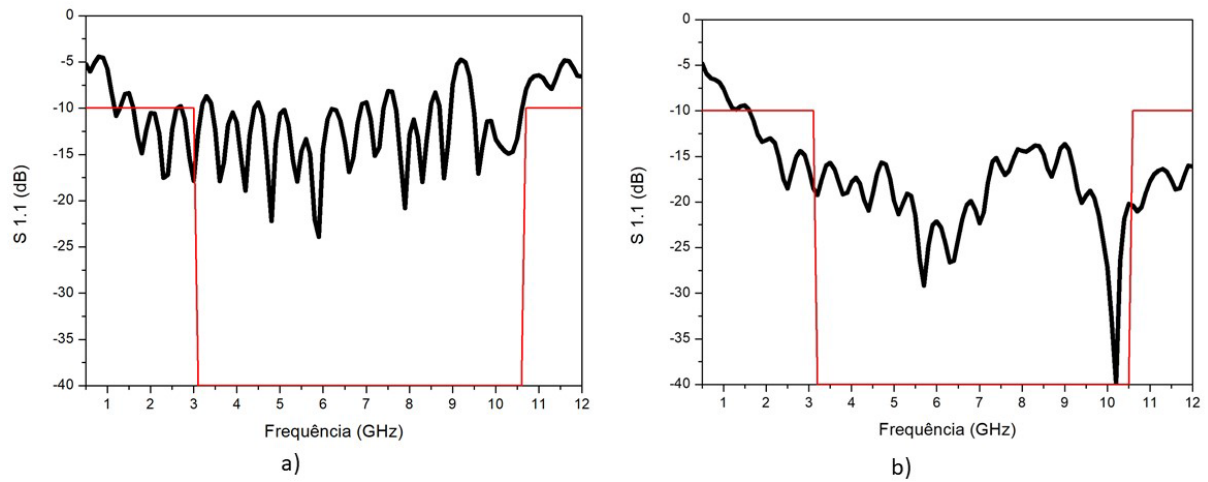


Fonte: Autoria própria.

Para o caso 3, com os gráficos de perda de retorno na Figura 24. Tem-se que em (a), que a antenna com *patch* elíptico atinge -10 dB em 1,2 GHz, e oscila os seus modos de frequência na faixa de -10 dB não se encaixando nos padrões UWB. Para (b), a antenna com *patch* bioinspirado ressoa em 1,7 GHz, com as frequências de UWB de 3,1GHz com -18,47 dB e 10,6 GHz com e -20,36 dB. Os melhores modos de frequências foram em 5,7 GHz com -29,19 dB, em 6,3 GHz com -26,61 dB e 10,2 GHz com -39,92 dB.

Concluindo-se que neste caso, somente a antenna com patch bioinspirado atuou na faixa de frequência da UWB.

Figura 24: Perda de retorno caso 3 a) *Patch* elítico b) *Patch* bioinspirado.

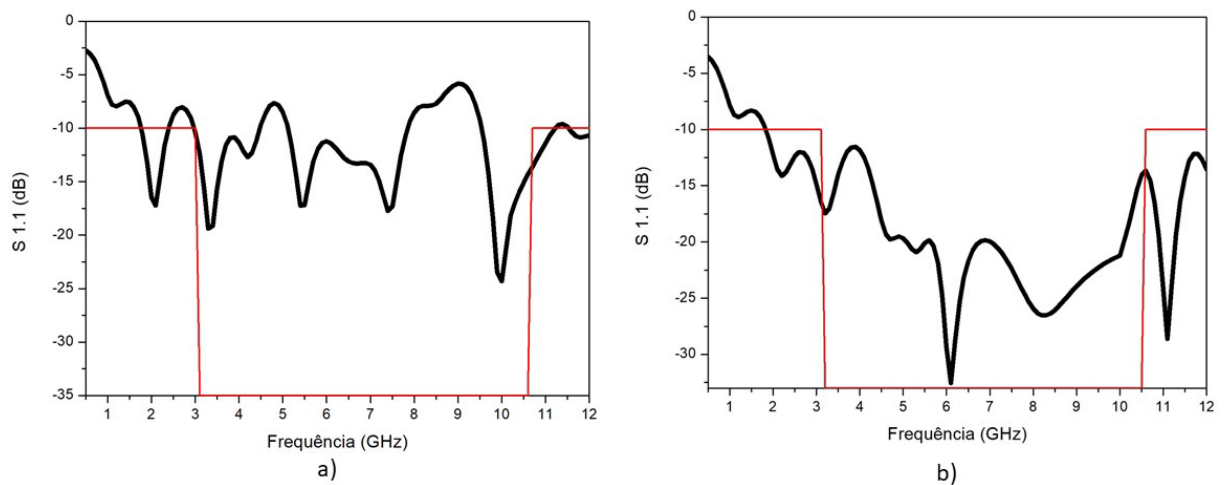


Fonte: Autoria própria.

No caso 4, os resultados estão demonstrados na Figura 25. Em que, para (a), com a antena com *patch* elíptico apresentou novamente os picos de frequência atingindo a faixa de -10 dB. Em (b), com a antena bioinspirada o início da faixa de -10 dB está em 1,9 GHz, com as frequências da UWB mínima em 3,1 GHz com -16,44 dB e em 10,6 GHz com -13,64 dB. As frequências em destaque foram com modos em 5,3 GHz com -20,90 dB, em 6,1 GHz com -32,56 dB e em 8,2 GHz com -26,52 dB.

Para este último caso comparativo, observa-se que novamente a antena com *patch* bioinspirado obteve melhor desempenho na faixa de frequência da UWB.

Figura 25: Perda de retorno caso 4 a) *Patch* elítico b) *Patch* bioinspirado.



Fonte: Autoria própria.

4.3.2. VSWR

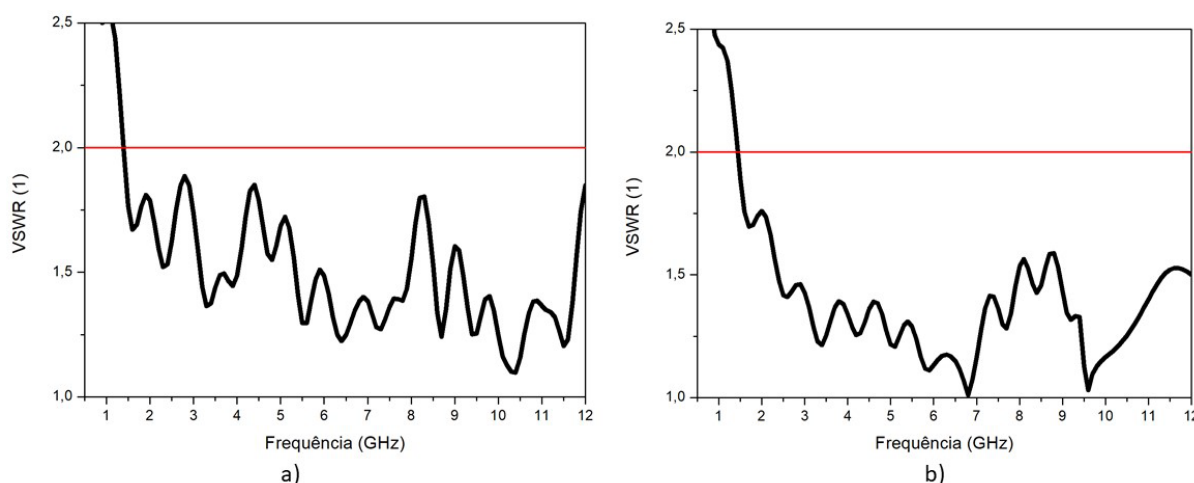
O próximo parâmetro analisado é o VSWR, que é uma relação do sinal refletido de volta para o emissor, em outras palavras é uma relação de perdas.

Para o caso 1 os gráficos de VSWR são mostrados na Figura 26. Em (a) com estrutura em *patch* elíptico, tem-se que com 1,4 GHz o VSWR abaixo de 2, e permanece assim até o limite do gráfico. Para as frequências de 3,1GHz e 10,6GHz do UWB, os valores de VSWR ficaram respectivamente com 1,58 e 1,25. Analisando os picos de frequências destacados anteriormente, tem-se que para 6,4 GHz o VSWR está com 1,22, para 8,7 GHz com 1,24, para 9,4 GHz com 1,25 e para 10,4 GHz é 1,09.

Para estrutura em (b) com *patch* bioinspirado, mostra que com 1,5 GHz o VSWR está abaixo da faixa de 2, e continua assim até o extremo do gráfico. As frequências indicadas do UWB ficaram com valores de 1,36 e 1,27. Os picos de frequência correspondentes obtiveram VSWR de 1,01 em 6,8 GHz e 1,12 em 9,8 GHz.

Com isso observa-se que ambas as antenas seguem a restrição do sistema UWB, onde tem que permanecer abaixo de 2 por toda faixa de frequência do sistema. No caso 1, a antena com *patch* bioinspirado teve melhor resposta nesse quesito, de forma que as frequências estudadas tiveram resposta próximo de um.

Figura 26: VSWR caso 1 a) *Patch* elítico b) *Patch* bioinspirado.



Fonte: Autoria própria.

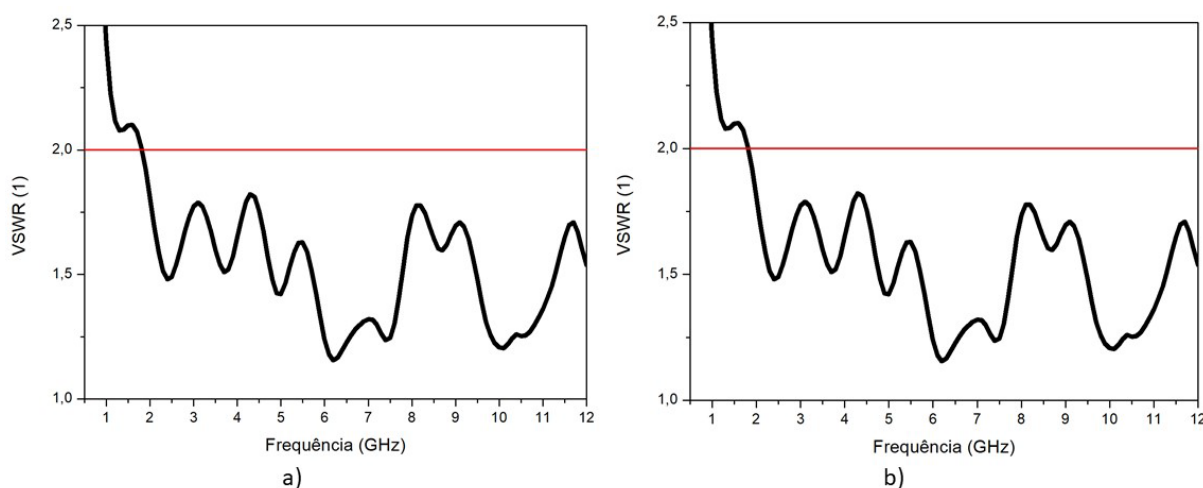
No caso 2, as representações gráficas do VSWR como mostra a Figura 27, para (a), mostra que em 1,9 GHz atinge o nível de 2 e permanece assim até o limite do gráfico. Para as frequências inicial e final do UWB, para a frequência menor com 1,78 e para a frequência maior

com 1,25. Analisando as melhores frequências citadas no gráfico de perda de retorno do caso 2, que são 6,2 GHz está com 1,15, em 7,4 GHz está com 1,23 e em 10 GHz está com 1,20.

Para (b), mostra que em 1,8 GHz trabalha abaixo de 2 e continua assim até o extremo do gráfico. As frequências do UWB ficaram com valores de 1,40 e 1,34, para as frequência menor e maior respectivamente. Os melhores pontos do gráfico da perda de retorno do caso 2 com *patch* bioinspirado foram 6,9 GHz ficou com 1,04 e para 10 GHz ficou com 1,10.

Neste caso, as duas antenas atingiram o requisito do UWB para o gráfico do VSWR, observa-se que a antena bioinspirada teve melhor resultado na frequência de 6,9 GHz, onde aproximou-se bastante de um.

Figura 27: VSWR caso 2 a) *Patch* elítico b) *Patch* bioinspirado.



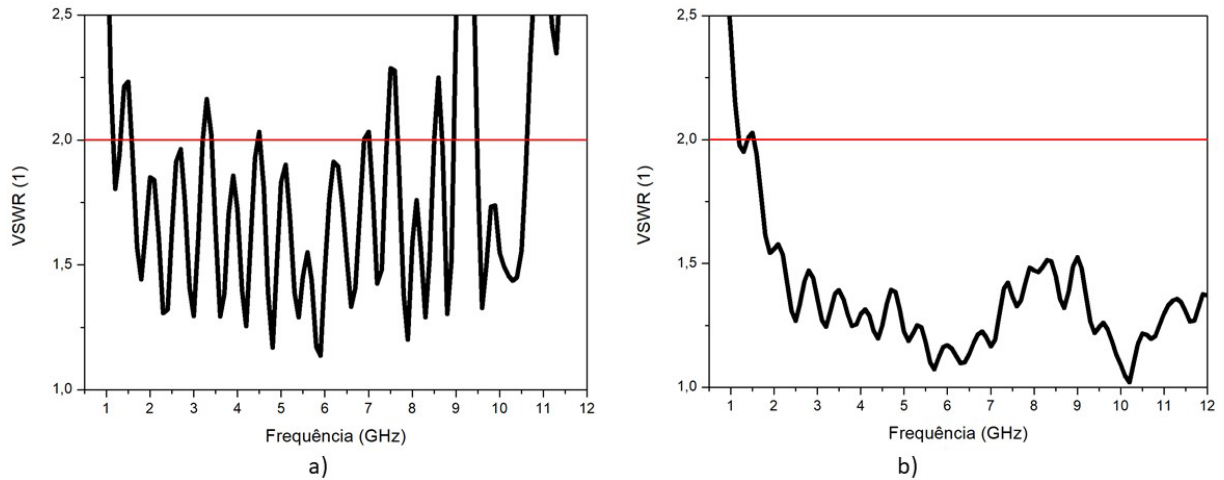
Fonte: Autoria própria.

Para o caso 3, os perfis do VSWR são ilustrados na Figura 28. Para (a) com estrutura elíptica, tem-se oscilação nos valores em relação ao nível de 2, em alguns momentos ultrapassando a faixa com o dobro do valor.

Para (b) com bioinspirada é mostrado que em 1,6 GHz o VSWR está abaixo de 2, e permanece assim até o extremo do gráfico. Nas frequências de UWB, os valores ficaram em 1,27 e 1,21, para as frequências de 3,1 GHz e 10,6 GHz, respectivamente. Para os modos de frequência em destaque são 5,7 GHz o VSWR com 1,07, em 6,3 GHz com 1,09 e em 10,2 GHz com 1,02.

Para esse caso, apenas a antena bioinspirada atingiu o requisito da faixa de frequência do UWB, onde a sua frequência com melhor resultado ficou próximo de um no gráfico do VSWR.

Figura 28: VSWR caso 3 a) *Patch* elítico b) *Patch* bioinspirado.



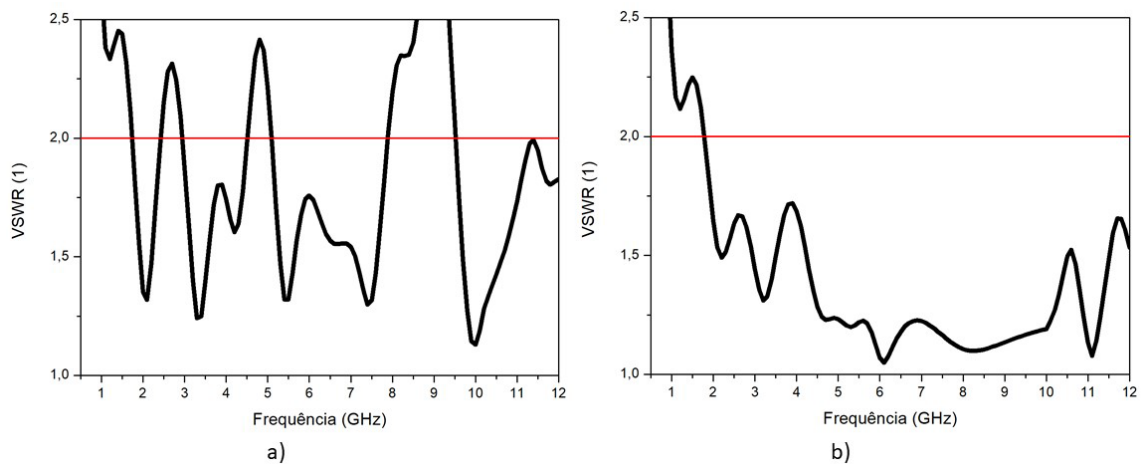
Fonte: Autoria própria.

Para o caso 4, os perfis gráficos do VSWR são mostrados na Figura 29. Para (a) com antena elíptica, novamente os resultados apresentam oscilações dos valores com relação a faixa de 2.

Para (b) com antena bioinspirada, os resultados mostram que em 1,8GHz o VSWR está abaixo de 2 e continua assim até o extremo do gráfico. Para as frequências do UWB, em 3,1 GHz tem-se 1,35, para 10,6 GHz obteve 1,52. Os modos de frequência em destaque mostram em 5,3 GHz o VSWR com 1,19, em 6,1 GHz com 1,04 e em 8,2 GHz com 1,09.

Neste caso, apenas a antena com *patch* bioinspirado teve resposta na faixa de frequência do UWB menor do que 2, observa-se que a sua frequência em destaque atinge valor próximo de um no gráfico do VSWR.

Figura 29: VSWR caso 4 a) *Patch* elítico b) *Patch* bioinspirado.



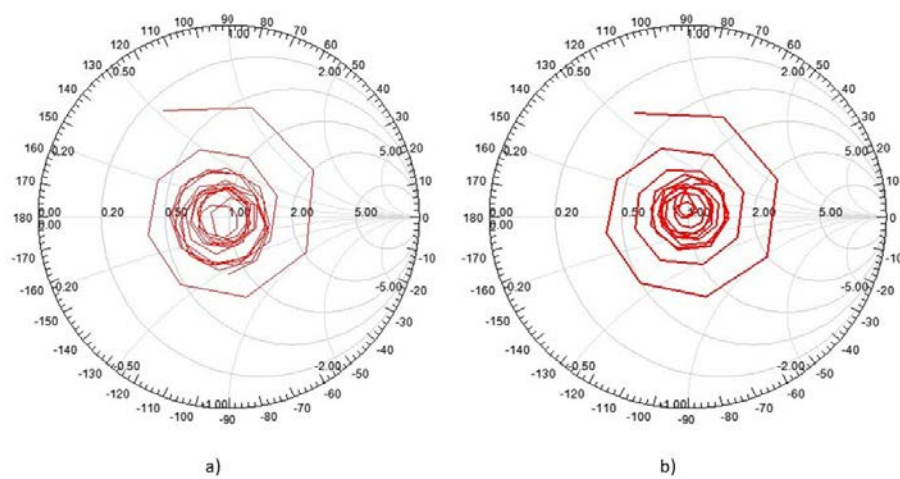
Fonte: Autoria própria.

4.3.3. Carte de Smith

O parâmetro analisado a seguir é a Carta de Smith, ferramenta utilizada para calcular e comparar diversos parâmetros da antena, de forma a demonstra as impedâncias em relação as frequências. Onde o casamento ideal da antena, acontece quando o gráfico passa o mais próximo do centro da carta, nesse caso o mais próximo de 1.

As cartas de Smith para o caso 1 são mostradas na Figura 30. Analisando ambos os gráficos, tem-se que estes trabalham próximo ao centro da carta, aproximando assim ao máximo da impedância de entrada.

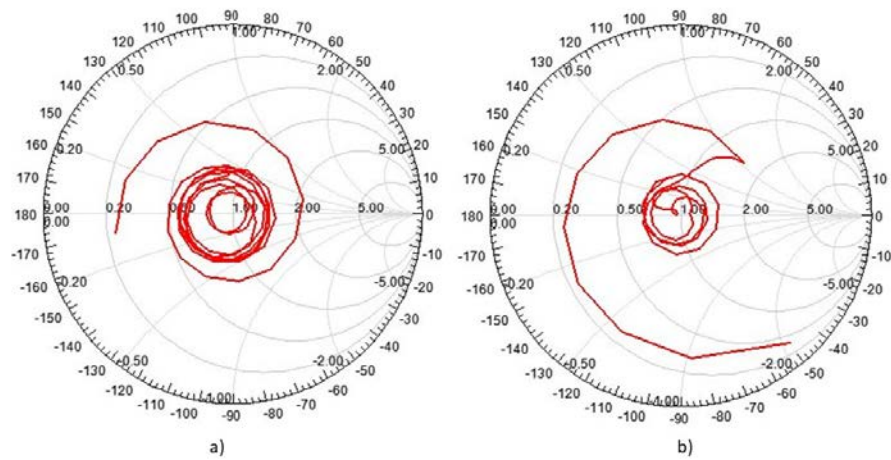
Figura 30: Carta de Smith caso 1 a) *Patch* elítico b) *Patch* bioinspirado.



Fonte: Autoria própria.

Para as cartas de Smith do caso 2, é representada na Figura 31. Para (a) a antena com *patch* elíptico que obteve bom desempenho de modo a permanecer um longo período próximo ao centro da carta. Em (b), com a antena bioinspirada tem-se um raio maior nas frequências iniciais, mas próximo de 2 GHz a antena trabalha com poucas perdas como mostra o espiral ao centro.

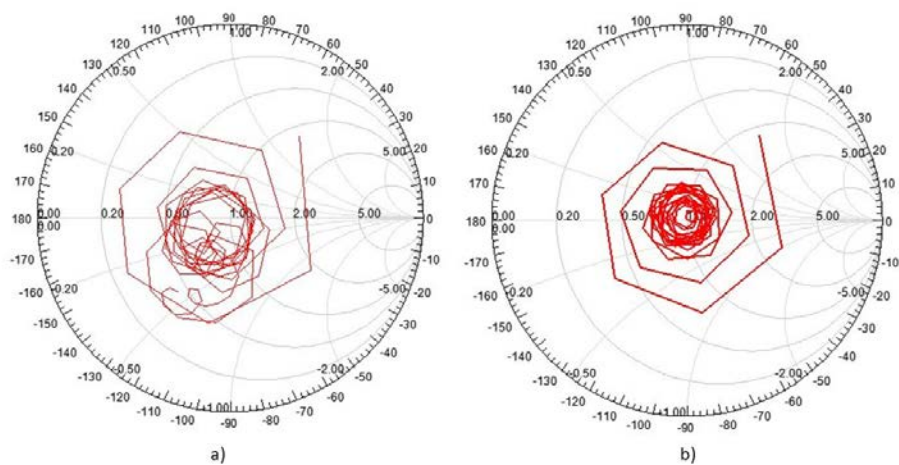
Figura 31: Carta de Smith caso 2 a) *Patch* elítico b) *Patch* bioinspirado.



Fonte: Autoria própria.

No caso 3, os gráficos estão demonstrados na Figura 32. Em (a) o gráfico mostra que a antena oscila bastante, de forma que os centros dos espirais não estão localizados no centro da carta, mas em certos momentos o gráfico mostra que fica próximo do centro. Comparando com a resposta obtida no gráfico da perda de retorno desta antena, onde em diversos pontos do gráfico ela atinge o ponto acima de -10 dB e em outros tem pequenas perdas. Assim observa-se que essa antena não se encaixa na faixa de operação do UWB. Em (b) pode-se ver que grande parte das espirais se concentra no centro da carta.

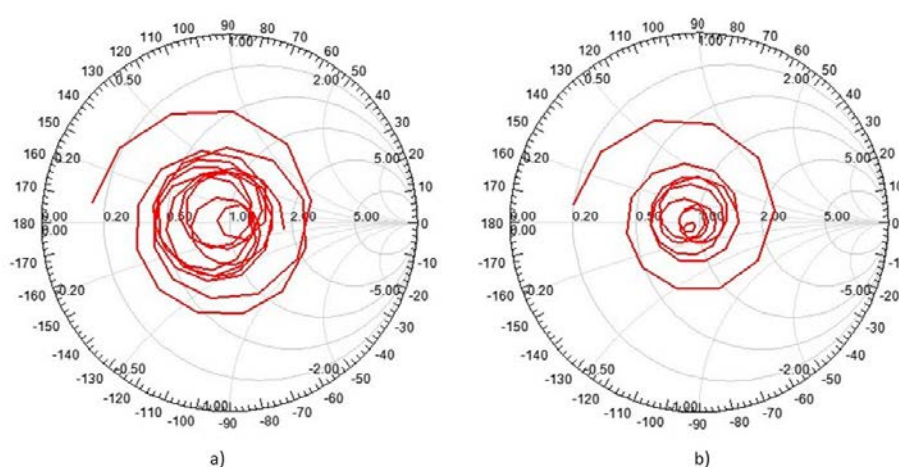
Figura 32: Carta de Smith caso 3 a) *Patch* elítico b) *Patch* bioinspirado.



Fonte: Autoria própria.

Para o caso 4, as cartas de Smith são dispostas na Figura 33. Em (a) os eixos centrais das espiras estão deslocados do eixo central da carta, mostrando de outra forma o porquê da resposta da perda de retorno está oscilando entre o -10 dB. Em (b) as espiras ficam próxima do centro da carta, dessa forma obtendo boa resposta para a antena bioinspirada

Figura 33: Carta de Smith caso 4 a) *Patch* elítico b) *Patch* bioinspirado.



Fonte: Autoria própria.

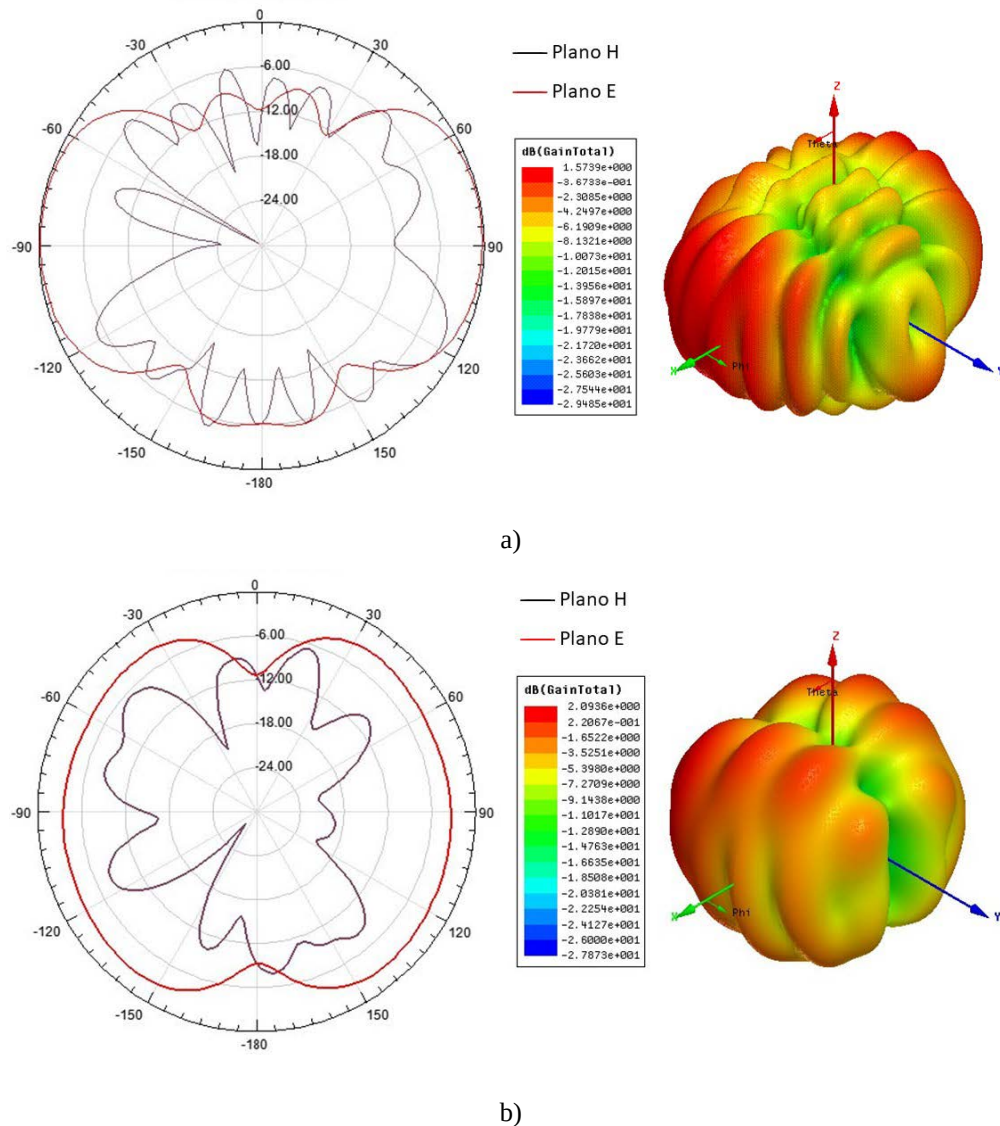
4.3.4. Diagramas de radiação 2D e 3D

Os últimos parâmetros analisados, estão dispostos no diagrama de radiação 2D e 3D. Estes diagramas mostram o comportamento das concentrações dos campos da antena, de modo a informar pontos específicos onde a antena tem melhor eficiência e maior ganho.

Em todas as antenas projetadas são observados para os gráficos 2D, antenas com propagação omnidirecionais, com vario lóbulos secundários pois apresentam plano de terra truncado.

Os diagramas do caso 1, são expostos na Figura 34, as frequências que tiveram os melhores desempenhos foram com 10,4 GHz para o *patch* elítico e 6,8 GHz para o *patch* bioinspirado. Analisando os diagramas observa-se que em (a) apresentou-se um ganho de 1,57 dB, e em (b) um ganho de 2,09 dB.

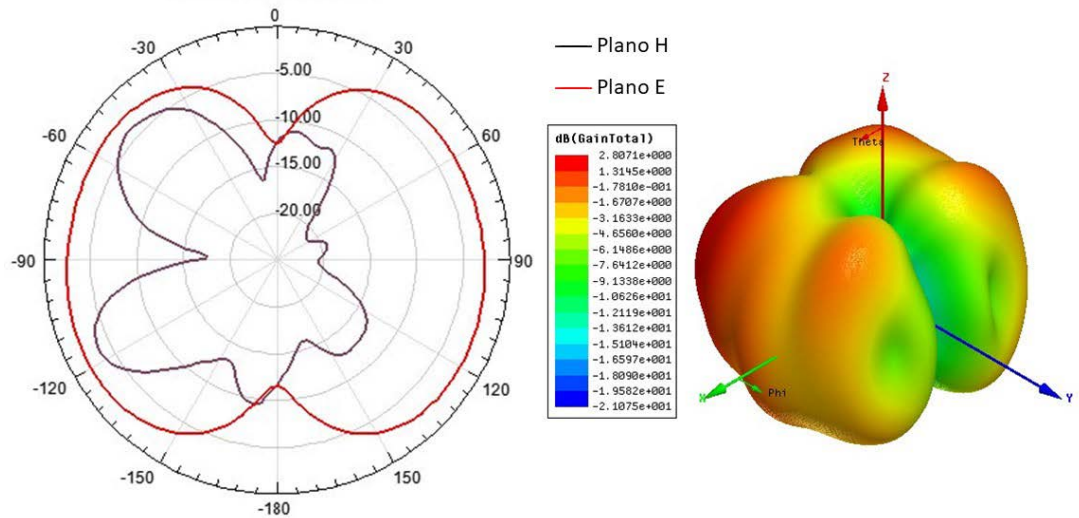
Figura 34: Diagramas de radiação 2D e 3D nos planos H e E para o caso 1 a) *Patch* elíptico para frequência de 10,4 GHz b) *Patch* bioinspirado para frequência de 6,8 GHz.



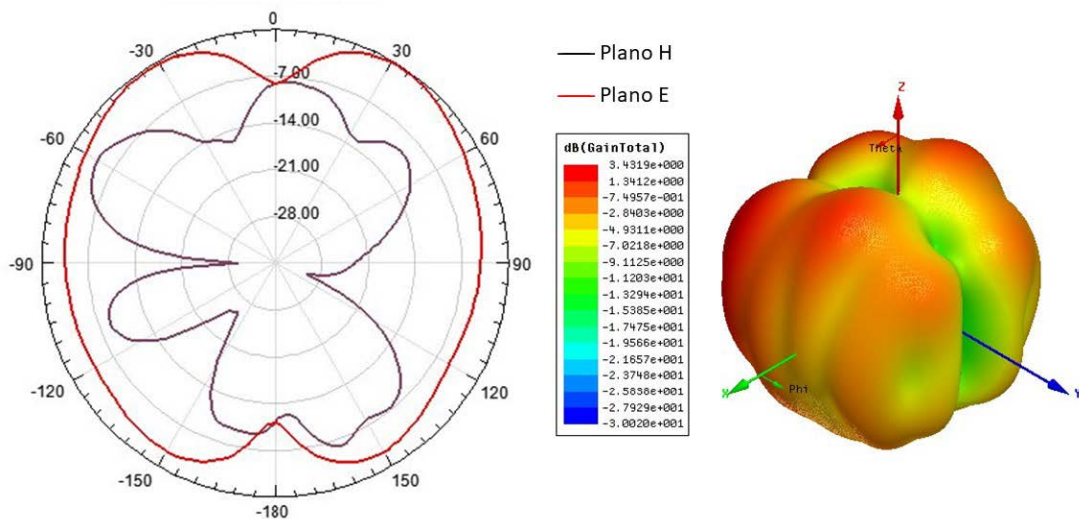
Fonte: Autoria própria.

Para o caso 2, é mostrado os diagramas na Figura 35, em que as frequências com melhores desempenhos são 6,2 GHz para o *patch* elíptico e em 6,9 GHz para o *patch* bioinspirado. Estudando os diagramas, observou-se que, em (a) teve um ganho de 2,8 dB, e em (b) alcançou um ganho de 3,43 dB.

Figura 35: Diagramas de radiação 2D e 3D nos planos H e E para o caso 2 a) *Patch* elíptico para frequência de 6,2 GHz b) *Patch* bioinspirado para frequência de 6,9 GHz.



a)

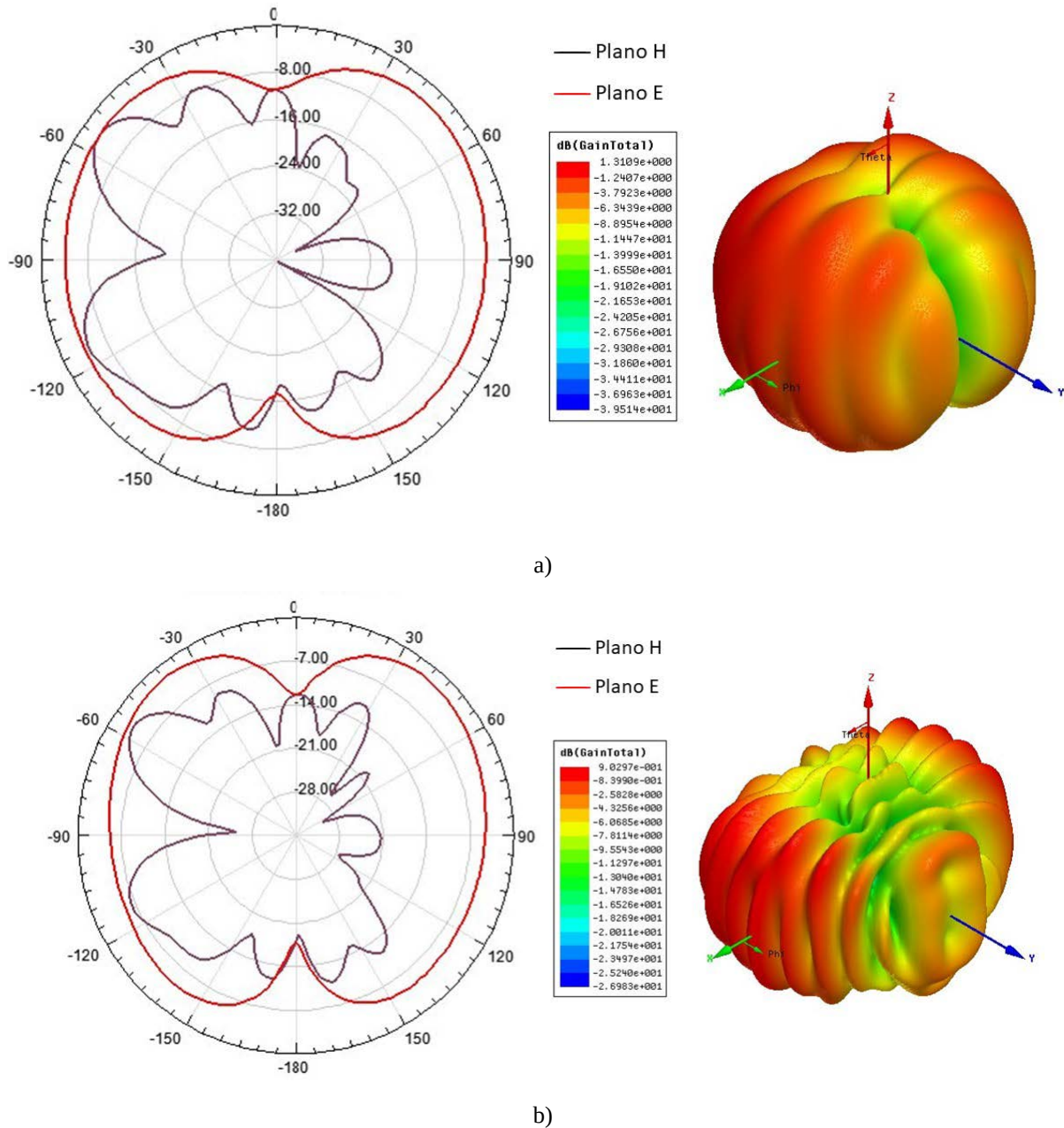


b)

Fonte: Autoria própria.

Os diagramas do caso 3, são mostrados na Figura 36. Para ilustrar o *patch* elíptico escolheu-se a frequência de 5,9 GHz e para o *patch* bioinspirado a frequência de 10,2 GHz. Analisando os casos, observou-se que, em (a) com ganho de 1,31 dB, e em (b) com ganho de 0,902 dB

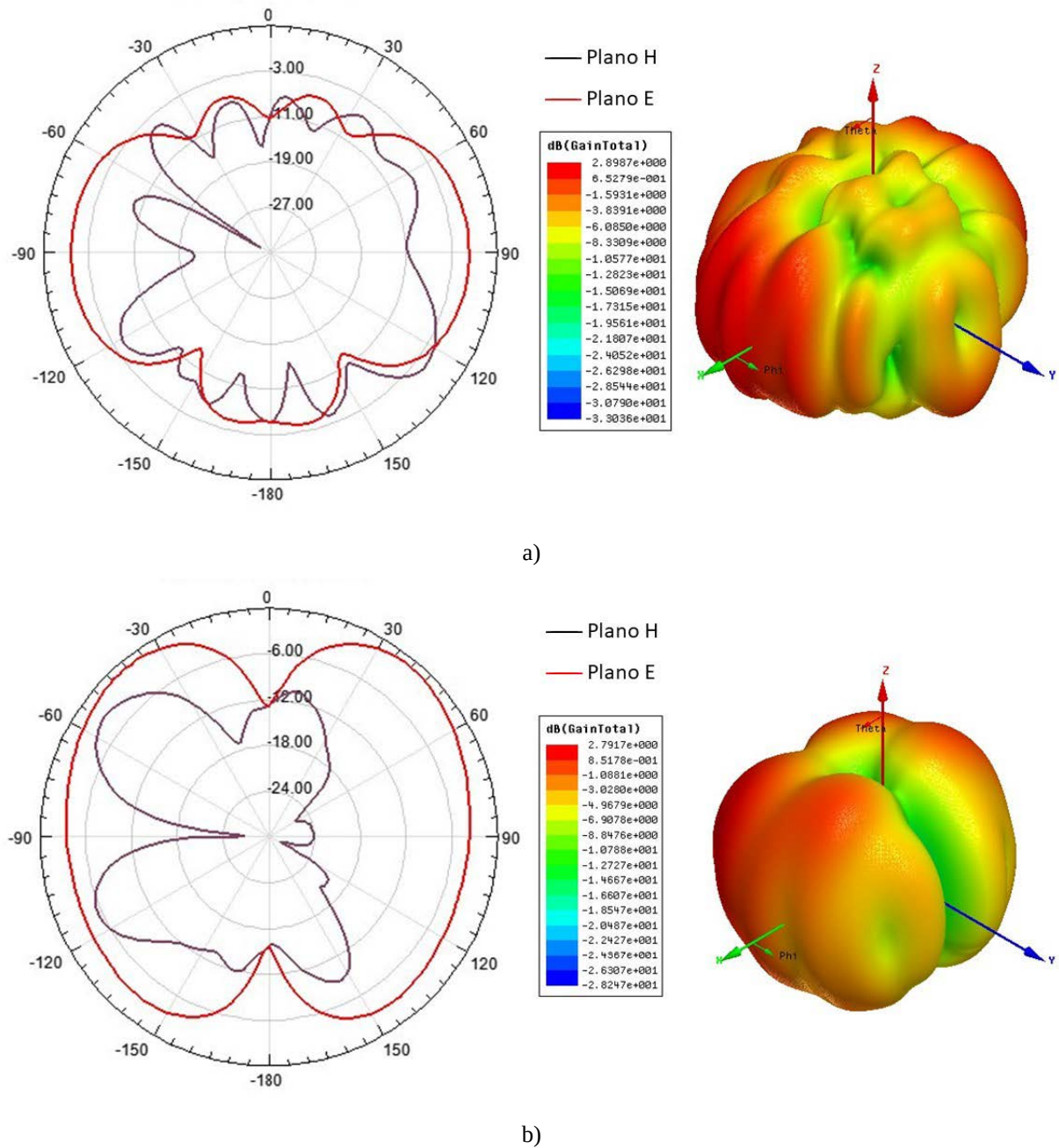
Figura 36: Diagramas de radiação 2D e 3D nos planos H e E para o caso 3 a) *Patch* elíptico para frequência de 5,9 GHz b) *Patch* bioinspirado para frequência de 10,2 GHz.



Fonte: Autoria própria.

Os diagramas do caso 4, são mostrados na Figura 37, para o *patch* elíptico a frequência selecionada foi 10 GHz e para o *patch* bioinspirado 6,1 GHz. Analisando os diagramas foi observado que para (a) teve um ganho de 2,89 dB, e para (b) com ganho de 2,79 dB.

Figura 37: Diagramas de radiação 2D e 3D nos planos H e E para o caso 4 a) *Patch* elíptico para frequência de 10 GHz b) *Patch* bioinspirado para frequência de 6,1 GHz.



Fonte: Autoria própria.

De modo geral, as antenas apresentaram bons resultados. Para o UWB as estruturas com melhor aplicação foram as com *patch* elíptico dos casos 1 e 2, e todas as antenas com *patch* bioinspirado na folha da carabeira. Com melhores respostas na banda UWB, nos picos de frequência e nos ganhos. Dessa forma, mostram que a motivação em estudar as folhagens das plantas em antenas de microfita foi bem-sucedida.

5. CONCLUSÃO

O trabalho em questão apresentou uma análise comparativa de antenas de microfitas com *patches* elípticos e bioinspirados na folha da carabeira, avaliando o desempenho destas diferentes formas na aplicação em sistema UWB. Também foram analisados diversos parâmetros das estruturas como, perda de retorno, VSWR, carta de Smith e diagramas de radiação 2D e 3D para os campos H e E.

A análise de quatro casos distintos para solução das frequências de projeto, consequentemente, das dimensões das antenas, foi desenvolvida com intuito de identificar a estrutura com melhor adequação ao sistema UWB. Assim, as antenas foram projetadas e simuladas em software HFSS, com estrutura em substrato de FR4, material PEC no *patch* e no plano de terra truncado.

Os resultados foram satisfatórios para as antenas analisadas, onde, apenas duas antenas de microfita com *patch* elíptico não se encontraram na faixa total de frequência UWB. E todas as antenas microfita com *patch* bioinspirado na folha da carabeira atuaram na banda UWB.

Recomendações para trabalhos futuros:

- Variação das dimensões do *patch* utilizando para outros tamanhos de folhas da carabeira;
- Também se pode aplicar métodos de ranhuras no plano de terra ou no *patch*;
- Utilização de alimentação de acoplamento por abertura, para ter maior largura de banda.

6. REFERÊNCIAS

Ansoft Corporation (HFSS), <http://www.ansoft.com/products/hf/hfss/>, Ansoft Corporation, Pittsburgh, PA.

ARAÚJO, José Bruno Oliveira de. **Projeto de Antenas de Microfita de Padrão Elíptico e Retangular Aplicadas á Tecnologia 5G**. 2017. 73 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Telecomunicações, Curso de Graduação em Engenharia de Telecomunicações, Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2017.

BAHL, I.J. and BHARTIA, P., **Microstrip Antennas**. Dedham MA: Artech House, 2001.

BALANIS, C.A., **Antenna Theory – Analysis and Design**. 3rd ed. John Wiley & Sons, Inc. NY, EUA. 2005.

BARROS, V. E. **Estudo do Efeito de Substrato Metamaterias em Parâmetros de Antenas de Microfita**. Dissertação de Mestrado apresentada ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação da UFRN. Natal, 2012.

BEZERRA, Rômulo Rodrigues de Moraes et al. **ANTENA PATCH BIOINSPIRADA EM UM TREVO DE TRÊS FOLHAS PARA A FAIXA DE FREQUÊNCIA DE COMUNICAÇÃO SEM FIO**. Revista Científica Semana Acadêmica, Fortaleza, v. -, n. 000109, p.1-11, abr. 2017.

CARNEIRO, R.F., **Desenvolvimento de substrato cerâmico BiNbO4 para antenas de microfita de sistemas de comunicação sem fio**, Tese, 82f, Natal, 2010.

CRUZ, Josiel do Nascimento et al. **Parametric Study of Printed Monopole Antenna Bioinspired on the Inga Marginata Leaves for UWB Applications**. Journal Of Microwaves, Optoelectronics And Electromagnetic Applications, [s.l.], v. 16, n. 1, p.312-322, mar. 2017. FapUNIFESP (SciELO). <<http://dx.doi.org/10.1590/2179-10742017v16i1891>>.

DE MOURA, Leidiane CM et al. **UWB cotton leaf design microstrip-fed printed monopole antenna**. In: Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC), 2015 SBMO/IEEE MTT-S International. IEEE, 2015. p. 1-4.

DELGADO, Jesus Alberto Viveros; MERA, Carlos Andres Viteri. **A Bio-Inspired Patch Antenna Array Using Fibonacci Sequences in Trees [Education Column]**. Ieee Antennas And Propagation Magazine, [s.l.], v. 55, n. 5, p.192-201, out. 2013. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <<http://dx.doi.org/10.1109/map.2013.6735514>>.

DESHMUKH, Amit A. et al. **Elliptical Slot Cut Ultra-wideband Antenna**. Institute Of Electrical And Electronics Engineers, Bangalore, v. 15, n. 1, p.1-6, jul. 2015.

GARG, R., BHARTIA, P., BAHL, I. and ITTIPIBOON, A., **Microstrip Antenna Design Handbook**, Artech House, chapter1, pp 47-55, 2001.

HOLANDA, Samanta Mesquita de. **DESENVOLVIMENTO DE SUBSTRATO DIELÉTRICO CIRCULAR DE ÓXIDO DE ZINCO (ZnO) PARA ANTENAS DE MICROFITA ATRAVÉS DE TÉCNICA SOL-GEL**. 2015. 54 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Energia, Ciências Ambientais e Tecnológicas, Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, 2015.

HOSSAIN, M. J.; FARUQUE, M. R. I.; ISLAM, M. T.. **Design of a patch antenna for ultra wide band applications**. Microwave And Optical Technology Letters, [s.l.], v. 58, n. 9, p.2152-2156, 27 jun. 2016. Wiley-Blackwell. <<http://dx.doi.org/10.1002/mop.29993>>.

JOSAN, Simranjit Kaur; SOHAL, J. S.; DHALIWAL, Balwinder Singh. **Design of elliptical microstrip patch antenna using Genetic Algorithms**. 2012 Ieee International Conference On Communication Systems (iccs), [s.l.], p.140-143, nov. 2012. IEEE. <<http://dx.doi.org/10.1109/iccs.2012.6406125>>.

KRETZSCHMAR, J.g.. **Wave Propagation in Hollow Conducting Elliptical Waveguides**. Ieee Transactions On Microwave Theory And Techniques, [s.l.], v. 18, n. 9, p.547-554, set.

1970. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE).
<<http://dx.doi.org/10.1109/tmtt.1970.1127288>>.

KUMPRASERT, N.. **Theoretical study of dual-resonant frequency and circular polarization of elliptical microstrip antennas. Ieee Antennas And Propagation Society International Symposium.** Transmitting Waves Of Progress To The Next Millennium. 2000 Digest. Held In Conjunction With: USNC/URSI National Radio Science Meeting (Cat. No.00CH37118), [s.l.], p.1015-1020, 2000. IEEE.
<<http://dx.doi.org/10.1109/aps.2000.875394>>.

LACERDA, Daniel Camelo; SANTOS JUNIOR, Aluisio Cesar dos. **O plano de terra juntamente com o patch, moldam o diagrama de radiação da antena.** 2008. 55 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, 2008.

MAHMOUD, Mahmoud N.; ELKAMCHOUCI, H.. **A bioinspired microstrip antennas based on the idea of a cockroach antenna.** Microwave And Optical Technology Letters, [s.l.], v. 53, n. 1, p.135-139, 22 nov. 2010. Wiley-Blackwell.
<<http://dx.doi.org/10.1002/mop.25668>>.

MAIA, Anamaria Sena. **ESTUDO DO COMPORTAMENTO DOS PARÂMETROS DE ANTENAS DE MICROFITA UTILIZANDO DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DE ARRANJOS DE ESTRUTURAS EBG/PBG.** 2016. 169 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Sistemas de Comunicação e Automação, Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, 2016. Disponível em:
<<http://bdtd.ufersa.edu.br:80/tede/handle/tede/716>>. Acesso em: 23 mar. 2018.

MEDEIROS, Júlio Cesar de Oliveira. **Princípios de Telecomunicações: Teoria e Prática.** 4. ed. São Paulo: Érica Ltda, 2012.

MEDEIROS, Thiago Esley de Lima. **Antenas de Microfita sobre substrato dielétrico organizado de forma quase periódica.** 2013. 54 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Sistemas de Comunicação e Automação, Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, 2013.

MUSEU DE HISTÓRIA NATURAL (Londres) (Org.). **Tabebuia aurea**. 2011. Disponível em: <<http://eol.org/pages/484657/overview>>. Acesso em: 06 abr. 2018.

NÓBREGA, Clarissa de Lucena. **Otimização dos Parâmetros de Monopolos planares de Microfita para aplicação em sistemas de banda ultra larga**. 2008. 88 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica e Computação, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal-rn, 2008.

PINGALE, Ajinkya et al. **Design of Elliptical Microstrip Antenna for Ultra Wide Band Applications**. International Journal Of Engineering And Technical Research (ijetr). Nagpur, p. 276-279. mar. 2015.

POZAR, D. M.; SHAUBERT, D. H.. **Microstrip antennas - The analysis and design of microstrip antennas and arrays**. New York, Usa: : The Ieee, 1995.

RAY, K. P.. **Design Aspects of Printed Monopole Antennas for Ultra-Wide Band Applications**. International Journal Of Antennas And Propagation, [s.l.], v. 2008, p.1-8, 2008. Hindawi Limited. <<http://dx.doi.org/10.1155/2008/713858>>.

RIOS, Luiz Gonzaga; PERRI, Eduardo Barbosa. **ENGENHARIA DE ANTENAS**. 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher Ltda, 2002.

SANTOS, Carlos Henrique da Silva; FIGUEROA, Hugo E. Hernandez. **Parallel bio-inspired algorithms in computational electromagnetics applications**. 2011 Sbmo/ieee Mtt-s International Microwave And Optoelectronics Conference (imoc 2011), [s.l.], p.886-890, out. 2011. IEEE. <<http://dx.doi.org/10.1109/imoc.2011.6169291>>.

SAYIDMARIE, Khalil H.; FADHEL, Yasser A.. **Design aspects of UWB printed elliptical monopole antenna with impedance matching**. 2012 Loughborough Antennas & Propagation Conference (lapc), [s.l.], p.1-4, nov. 2012. IEEE. <http://dx.doi.org/10.1109/lapc.2012.6403010>.

SERRES, Alexandre Jean René et al. Bio-Inspired Microstrip Antenna. Trends In Research On Microstrip Antennas, [s.l.], p.87-109, 15 nov. 2017. InTech. <<http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.69766>>.

SHEN, Liang. **The elliptical microstrip antenna with circular polarization.** Ieee Transactions On Antennas And Propagation, [s.l.], v. 29, n. 1, p.90-94, jan. 1981. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <<http://dx.doi.org/10.1109/tap.1981.1142545>>.

SILVA JÚNIOR, Paulo Fernandes da. **PROJETO DE ANTENAS BIOINSPIRADAS EM PLANTAS PARA SISTEMAS DE COMUNICAÇÃO SEM FIO.** 2015. 135 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, João Pessoa – Pb, 2015.

SILVA JÚNIOR, Paulo Fernandes da; SILVA, Jefferson Costa e; SILVA, Paulo Henrique da Fonseca. **Projeto de uma Antena de Folha para 700 MHz.** Momag 2014: 16º Sbmo-simpósio Brasileiro de Micro-ondas e Optoeletrônica e 11º Cbmag-congresso Brasileiro de Eletromagnetismo, João Pessoa, v. 11, n. 16, p.758-763, 03 ago. 2015. Disponível em: <https://www.researchgate.net/profile/Paulo_Silva_Jr2/publication/280625451_Antena_folha_700MHz/links/55bfa7b908ae9289a09b5e4f.pdf>. Acesso em: 03 abr. 2018.

SILVA, Henrique Adller Medeiros. **Análise de Antenas de Microfita Bioinspiradas e Fractais.** 2017. 111 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica e Computação, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2017.