



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E INFORMÁTICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

Larissa de Almeida Ramos

**PROJETO DE UMA ANTENA BIOINSPIRADA NA FOLHA
DE AMORA PARA APLICAÇÃO MULTIBANDA EM
4G/LTE E 5G**

Campina Grande, PB
Maio 2021

Larissa de Almeida Ramos

**PROJETO DE UMA ANTENA BIOINSPIRADA NA FOLHA DE AMORA
PARA APLICAÇÃO MULTIBANDA EM 4G/LTE E 5G**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Coordenação de Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Jean René Serres

Campina Grande, PB

Maio de 2021

Larissa de Almeida Ramos

**PROJETO DE UMA ANTENA BIOINSPIRADA NA FOLHA DE AMORA
PARA APLICAÇÃO MULTIBANDA EM 4G/LTE E 5G**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Coordenação de Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Trabalho aprovado em: ____ / ____ / ____

Alexandre Jean René Serres, DSc

Professor Orientador

Edmar Candeia Gurjão, DSc

Professor Avaliador

Campina Grande, PB

Maio 2021

*Dedico este trabalho aos meus amados pais,
Maria Dulce de Almeida e Ubirajara de Souto Ramos*

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus, por ter me guiado em todo o caminho da graduação, por todo amparo em momentos difíceis, por todos os ensinamentos e bênçãos concedidas, por me fazer entender que a vida é muito mais do que atinge minha compreensão.

À Nossa Senhora, por interceder pela minha vida e meus sonhos, por levar minhas orações para mais perto do céu.

Aos meus pais, Dulce e Ubirajara, por todo apoio ao longo deste caminho, por todas as orações, por todos os esforços realizados para que eu tivesse uma boa educação, por todo amor e amparo em todos os momentos, especialmente nos mais difíceis. Eu não seria quem sou hoje sem vocês. Aos demais membros da minha família, que acreditaram e torceram por mim.

A minha amiga Morgana, que mesmo depois de tantos anos, e seguindo um caminho completamente distinto ao meu, se fez presente ao longo da minha vida, torcendo pelos meus sonhos. Aos demais amigos que fiz durante o período escolar, sou grata pelos momentos vividos, ensinamentos compartilhados e torcida constante.

Às pessoas extraordinárias que curso me proporcionou conhecer, Taís, Isabel, Larissa, Guerra, Sílvia, Alison, Weverton, Marília, Joyce, Rebeca, Erika, Jorginho e Hérciles, cujos momentos compartilhados, ajuda, suporte emocional e amizade foram muito importantes durante a caminhada. Agradeço por terem contribuído para que eu chegasse até aqui. Guardarei boas lembranças de cada história vivida.

Ao professor orientador, Alexandre, agradeço toda a paciência, orientação e ensinamentos, além de toda ajuda nas etapas de construção do presente trabalho.

Deixo meus agradecimentos também à Isabel, que com disposição, paciência e generosidade, me ajudou e esclareceu as inúmeras dúvidas que tive durante esta etapa final, como também ao longo dos anos.

Por fim, deixo aqui meus agradecimentos aos que, direta ou indiretamente, fizeram parte da caminhada e contribuíram para minha formação.

"My mum always said things we lose have a way of coming back to us in the end. If not always in the ways we expect."

J.K. Rowling

Resumo

Este trabalho apresenta o projeto de uma antena com estrutura bioinspirada na geometria da folha de amora para aplicações em sistemas de comunicação sem fio. Com o uso da superfórmula de Gielis, otimizou-se uma antena multibanda projetada a partir da técnica de adição de *patches*. Após simulações, verificou-se que a antena bioinspirada projetada opera na faixa de 1,1 à 6,69 GHz. Em 4G/LTE à 1,8 e 2,6 GHz obteve-se S11 equivalente à -11,48 e -14,49 dB, respectivamente, e ganhos de 4,21 e 4,41 dBi, respectivamente. Em 5G à 3,5 GHz obteve-se S11 equivalente à -22,77 dB e ganho de 5,29 dBi.

Palavras-chave: Antena Bioinspirada, Folha de Amora, Superfórmula de Gielis, Antena Multibanda, Técnica de Adição de *Patches*, 4G/LTE, 5G

Abstract

This work presents the design of an antenna with a bioinspired structure in the geometry of the mulberry leaf for applications in wireless communication systems. Using the Gielis superformula, a multiband antenna was optimized using the patch addition technique. After simulations, it was found that the projected bioinspired antenna operates in the range of 1.1 to 6.69 GHz. In 4G / LTE at 1.8 and 2.6 GHz, S11 was obtained equivalent to -11.48 and -14.49 dB, respectively, and gains of 4.21 and 4.41 dBi, respectively. In 5G at 3.5 GHz, S11 was obtained, equivalent to -22.77 dB and gain of 5.29 dBi.

Keywords: Bioinspired Antenna, Mulberry Leaf, Gielis Superformula, Multiband Antenna, Patch Addition Technique, 4G / LTE, 5G.

Lista de Figuras

Figura 1 - Estrutura de uma antena <i>multipatch</i> genérica que funciona em quatro frequências de ressonância distintas: f_{r1} , f_{r2} , f_{r3} e f_{r4}	3
Figura 2 - Estrutura de uma antena <i>patch</i> de microfita	4
Figura 3 - Passos do projeto da antena multibanda	7
Figura 4 - Formas abstratas obtidas com a modificação dos parâmetros da superfície de Gielis	8
Figura 5 - Antena multibanda simulada	10
Figura 6 - Gráfico do S11 da antena multibanda	11
Figura 7 - Gráfico do VSWR da antena multibanda	11
Figura 8 - v	12
Figura 9 - Folha de amora	13
Figura 10 - Antena bioinspirada na folha de amora	14
Figura 11 - Comparativo entre as dimensões da antena multibanda e a antena bioinspirada	14
Figura 12 - Gráfico do S11 da antena bioinspirada	15
Figura 13 - Gráfico do VSWR da antena bioinspirada	15
Figura 14 - Padrões de irradiação 2D da antena bioinspirada na folha de amora, para o plano de elevação ($\phi = 0^\circ$) e para o plano azimutal ($\theta = 90^\circ$), operando em 1,8, 2,6 e 3,5 GHz, respectivamente, expressos em função do ganho total.	16
Figura 15 - Padrões de irradiação 3D da antena bioinspirada na folha de amora, operando em 1,8, 2,6 e 3,5 GHz, respectivamente, expressos em função do ganho total.	17

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Bandas de Frequência funcionando em 4G/LTE e 5G	1
Tabela 2 - Dimensões dos <i>patches</i> calculadas para cada frequência de ressonância	9
Tabela 3 - Dimensões calculadas da linha de alimentação da antena multibanda	10
Tabela 4 - Faixa de Frequências (em GHz), Largura de Banda (em MHz) e a Largura de Banda Percentual para 0,65, 1,86, 2,57 e 3,50 GHz	12
Tabela 5 - Parâmetros da superfórmula de Gielis utilizados na simulação	14
Tabela 6 - Eficiência da antena	17

Lista de Abreviaturas e Siglas

FR4 *Flame Resistant* (comumente chamado de fibra de vidro)

HFSS *High Frequency Structure Simulator*

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Objetivos	1
1.1.1	Objetivo Geral	1
1.1.2	Objetivos Específicos	2
1.2	Metodologia	2
1.3	Estrutura do Trabalho	2
2	Fundamentação Teórica	3
2.1	Antenas Multibanda e a Técnica de Adição de <i>Patches</i>	3
2.2	Antenas Bioinspiradas	7
3	Resultados e Discussões	9
3.1	Projeto da Antena Multibanda	9
3.1.1	Cálculo das dimensões dos <i>patches</i> e da linha de alimentação da antena multibanda	9
3.1.2	Simulação da antena multibanda	10
3.2	Simulação da antena bioinspirada	13
4	Conclusão e Proposta para Trabalhos Futuros	18
	Referências Bibliográficas	19

1 Introdução

Na última década, uma grande variedade de dispositivos portáteis habilitados para redes sem fio, como smartphones, tablets e laptops foram introduzidos. A implementação de novas tecnologias móveis aumenta ainda mais os requisitos de largura de banda dos sistemas sem fio, a fim de cobrir as bandas de frequência 4G/LTE à 0,7, 1,8 e 2,6 GHz e 5G à 3,5 GHz recentemente alocadas (Panwar et al, 2016). A Tabela 1 apresenta as referidas bandas de frequência.

Tabela 1: Bandas de Frequência funcionando em 4G/LTE e 5G

	Frequência Central	<i>Uplink</i>	<i>Downlink</i>
4G/LTE	0,7 GHz	703 – 748 MHz	758 – 803 MHz
	1,8 GHz	1710 – 1785 MHz	1805 – 1880 MHz
	2,6 GHz	2500 – 2570 MHz	2620 – 2690 MHz
5G	3,5 GHz	3300 – 3800 MHz	3300 – 3800 MHz

Fonte: (Autora, 2021).

Antenas multibanda são necessárias nos sistemas de comunicação sem fio de hoje porque a alocação de frequência determinada está em várias bandas de frequência diferentes e distantes. Isso não pode ser acomodado por uma antena de banda única. Além disso, a antena de microfita tem limitações em termos de largura de banda, por isso, o design de antena multibanda pode ser uma solução para limitações de largura de banda de forma a suportar os requisitos de faixa de frequência dos sistemas de comunicação sem fio (Rusmono e Marani, 2019).

Neste trabalho tem-se como motivação estudar técnicas de projeto de antenas para aplicação multibanda e, posteriormente, otimizar a estrutura para um formato bioinspirado utilizando a superfórmula de Gielis. Existem várias aplicações da superfórmula para projetar as estruturas em formas naturalísticas. Os resultados preliminares mostraram que essa abordagem em antenas de microfita permite projetos de antenas de menor tamanho e alto ganho, se comparados com o uso de formatos de *patch* convencionais (Ulu e Bardak, 2020).

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

O presente trabalho tem o objetivo de desenvolver, por meio de simulações, uma antena com formato bioinspirado para aplicação multibanda em 4G/LTE e 5G.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Investigar as técnicas utilizadas para desenvolver antenas multibanda.
- Buscar estruturas otimizadas com formato bioinspirado.
- Avaliar o desempenho das antenas, tais como, parâmetro de espalhamento, ganho e padrão de irradiação.

1.2 Metodologia

Inicialmente foi feita uma revisão bibliográfica sobre os assuntos relacionados ao tema, investigando as principais topologias de antenas para aplicação multibanda. Em seguida, foram aplicadas técnicas para adaptar a antena inicialmente projetada para um formato bioinspirado com auxílio da superfórmula de Gielis, de forma a otimizar a estrutura.

Todas as simulações foram implementadas no *software* HFSS da ANSYS®), para avaliar alguns parâmetros que caracterizam o desempenho das antenas, tais como, parâmetro de espalhamento, ganho e padrão de irradiação.

Mediante as simulações e análise do sinal obtido, foi apresentada uma antena cujo funcionamento se dá nas tecnologias 4G/LTE e 5G.

1.3 Estrutura do Trabalho

No Capítulo 1 foi feita, brevemente, uma introdução do trabalho desenvolvido, explicando um pouco do problemática, bem como dos objetivos e metodologia aplicada.

No capítulo 2 é realizada a fundamentação teórica, abordando os temas mais relevantes ao desenvolvimento do trabalho. São descritos os conceitos básicos de antenas multibanda, com ênfase ao método de adição de *patches*, além de uma explanação sobre antenas bioinspiradas e a superfórmula de Gielis.

No capítulo 3 são apresentados os resultados das simulações das antenas com as devidas discussões.

No capítulo 4 apresenta-se a conclusão do trabalho e propostas futuras visando complementar as atividades desenvolvidas.

2 Fundamentação Teórica

Neste capítulo são descritos os conceitos básicos de antenas multibanda, com ênfase ao método de adição de *patches*, além de uma explanação sobre antenas bioinspiradas e a superfórmula de Gielis.

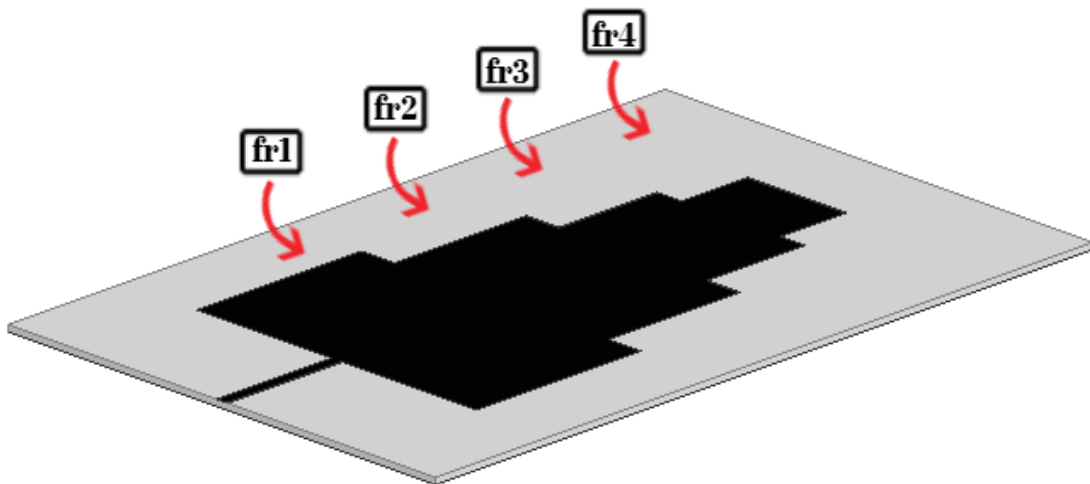
2.1 Antenas Multibanda e a Técnica de Adição de *Patches*

As tecnologias em crescimento no cenário moderno exigem produtos de comunicação sem fio que sejam capazes de fornecer vários serviços com um único dispositivo. As antenas multibanda desempenham um papel importante e são extremamente desejadas, podendo ser utilizadas simultaneamente para diferentes frequências de sinal. (Srivastava *et al*, 2016)

Em vários estudos de antenas multibanda anteriormente realizados, foi examinado o desenvolvimento de diferentes métodos de *design*. Dentre eles, podemos destacar aquele que será objeto de estudo: o método da adição de *patches*.

A técnica de adição de *patches* é utilizada para produzir mais de uma banda de frequência através de um arranjo de várias antenas *patches* com tamanhos distintos (Rusmono, 2020). A Figura 1 apresenta uma antena *multipatch* genérica, projetada com quatro *patches* de diferentes dimensões, cujo funcionamento se dá em quatro frequências de ressonância distintas, aqui denominadas f_{r1} , f_{r2} , f_{r3} e f_{r4} .

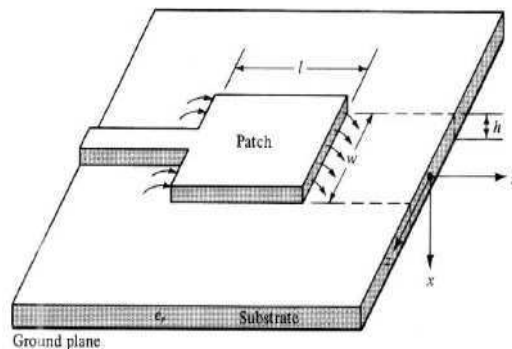
Figura 1: Estrutura de uma antena *multipatch* genérica que funciona em quatro frequências de ressonância distintas: f_{r1} , f_{r2} , f_{r3} e f_{r4}



Fonte: (Autora, 2021).

Pela análise da figura é possível inferir que, à medida que encadeamos *patches* com dimensões distintas, a estrutura passa a funcionar em diferentes frequências, ampliando a capacidade de cobertura. A estrutura básica de uma antena *patch* de microfita está ilustrada na Figura 2, sendo composta por um substrato, um elemento irradiante e o plano de terra.

Figura 2: Estrutura de uma antena *patch* de microfita



Fonte: (Rusmono, 2020).

Para determinar os parâmetros de design de uma antena *patch* é necessário seguir os próximos passos (Balanis, 2005):

1. Cálculo da largura do *patch* (W):

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

onde

c é a velocidade da luz no espaço livre. 3×10^8 m/s

ϵ_r é a permissividade elétrica relativa

f_r é a frequência de ressonância

2. Cálculo da permissividade elétrica efetiva (ϵ_{eff}):

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(\frac{1}{\sqrt{1 + \frac{12h}{W}}} \right) \quad (2)$$

onde

h é a altura do substrato

ϵ_r é a permissividade elétrica relativa

W é a largura do *patch*

3. Cálculo do comprimento do *patch* (L):

$$L = L_{eff} - 2\Delta L \quad (3)$$

sabendo que

$$L_{eff} = \frac{c}{2f_r \sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (4)$$

e

$$\Delta L = 0,412h \frac{(e_{eff} + 0,3)\left(\frac{W}{h} + 0,264\right)}{\left((e_{eff} - 0,258)\left(\frac{W}{h} + 0,8\right)\right)} \quad (5)$$

onde:

L_{eff} é o comprimento efetivo

ΔL é a extensão de comprimento

c é a velocidade da luz no espaço livre. 3×10^8 m/s

ϵ_r é a permissividade elétrica relativa

ϵ_{eff} é a permissividade elétrica efetiva

f_r é a frequência de ressonância

h é a altura do substrato

W é a largura do *patch*

4. Cálculo da largura da linha de alimentação do *patch* (W_0):

- Para $W_0/h < 2$

$$\frac{W_0}{h} = \frac{8e^A}{8e^{2A} - 2} \quad (6)$$

- Para $W_0/h > 2$

$$\frac{W_0}{h} = \frac{2}{\pi} \left[B - 1 - \ln(2B - 1) + \frac{\epsilon_r - 1}{2\epsilon_r} \left(\ln(B - 1) + 0,39 - \frac{0,61}{\epsilon_r} \right) \right] \quad (7)$$

sabendo que

$$A = \frac{Z_0}{60} \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2}} + \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 1} \left(0,23 + \frac{0,11}{\epsilon_r} \right) \quad (8)$$

e

$$B = \frac{377\pi}{2Z_0\sqrt{\epsilon_r}} \quad (9)$$

onde

Z_0 é a impedância característica

ϵ_r é a permissividade elétrica relativa

ϵ_{eff} é a permissividade elétrica efetiva

5. Cálculo do comprimento da linha de alimentação do *patch* (L_0):

$$L_0 = \frac{c}{4f_r\sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (10)$$

onde

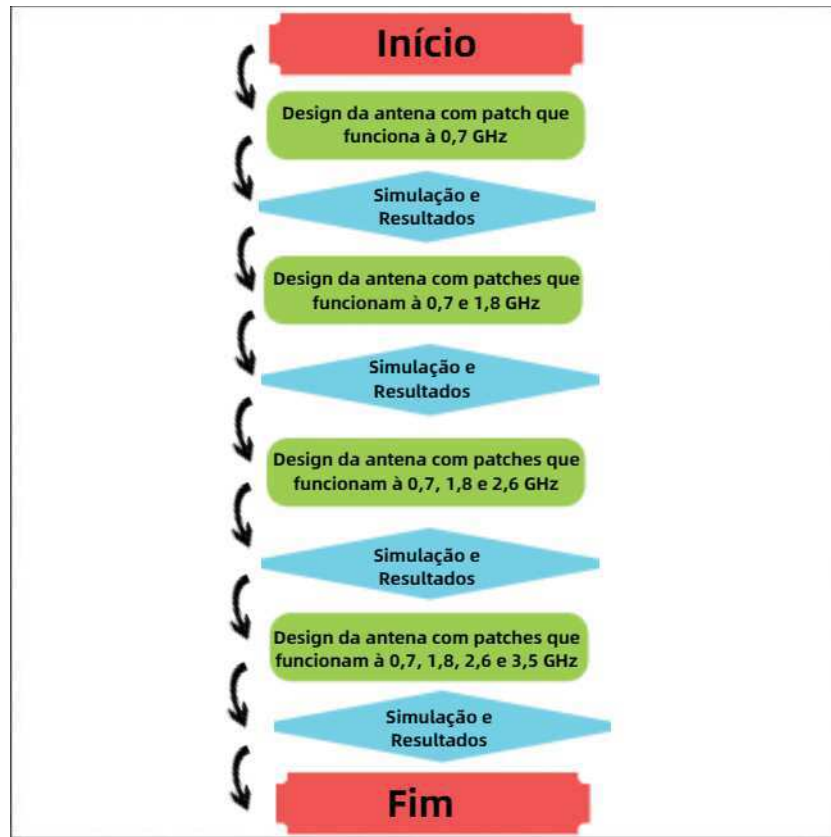
c é a velocidade da luz no espaço livre. 3×10^8 m/s

ϵ_{eff} é a permissividade elétrica efetiva

f_r é a frequência de ressonância

Para o presente trabalho, tem-se como propósito, inicialmente, que a antena multi-banda projetada funcione à 3,5 GHz na tecnologia 5G e à 0,7, 1,8 e 2,6 GHz na tecnologia 4G/LTE. A Figura 3 ilustra a sequência de passos proposta para o projeto dessa antena.

Figura 3: Passos do projeto da antena multibanda



Fonte: (Autora, 2021).

2.2 Antenas Bioinspiradas

O estudo de antenas de microfita com geometrias bioinspiradas tem despertado interesse entre pesquisadores e produzido resultados significativos. As folhas são utilizadas como modelo por apresentarem características semelhantes às das antenas no que diz respeito à recepção de ondas eletromagnéticas, pois as folhas captam a luz solar e a transformam em energia química para a sobrevivência da planta (De Oliveira et al, 2017).

Em 2003, Johan Gielis descobriu que quase todas as curvas podem ser definidas como uma superfórmula (Ulu e Bardak, 2020). Baseando-se na superelipse que é definida por

$$\left| \frac{x}{a} \right|^n + \left| \frac{y}{b} \right|^n = 1 \quad (11)$$

Gielis desenvolveu uma superfórmula fazendo uso de coordenadas polares $r = f(\theta)$ para substituir $x = r \cdot \cos(\theta)$ e $y = r \cdot \sin(\theta)$, além de inserir o argumento $\frac{m}{4}$ para criar simetrias rotacionais específicas. O expoente n também pode sofrer variação, subdividindo-se em n_1 , n_2 e n_3 (Gielis, 2003) e (Serres et al, 2017). Esta expressão também pode ser combinada

com outras funções, θ , gerando outras formas (Serres et al, 2017). A superfórmula de Gielis pode ser representada pela Equação 12.

$$r(\theta) = f(\theta) \frac{1}{\left(\left| \frac{\cos\left(\frac{m}{4}\theta\right)}{a} \right|^{n_2} + \left| \frac{\sin\left(\frac{m}{4}\theta\right)}{b} \right|^{n_3} \right)^{\frac{1}{n_1}}} \quad (12)$$

onde




















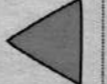


































a, b são parâmetros de alongamento ao longo dos eixos

m define a simetria rotacional

n_1, n_2, n_3 são coeficientes de forma

Alterando os parâmetros (a, b, m, n_1, n_2 e n_3) a cada vez, diferentes formas podem ser obtidas. Formas semelhantes à natureza, como folhas, podem ser imitadas com esta superfórmula. No entanto, nem todos os formatos são apropriados para o projeto da antena devido às propriedades de simetria e à fabricação das antenas (Ulu e Bardak, 2020). A Figura 4 ilustra algumas formatos abstratos obtidos com a superfórmula de Gielis a partir da modificação de parâmetros.

Figura 4: Formas abstratas obtidas com a modificação dos parâmetros da superfórmula de Gielis

Rotational symmetry m	$m = n_2 = n_3 = 1$	$n_1 = 1000$ $n_2 = n_3$	$n_1 = n_2 = n_3 = 1/2$	$n_1 = 30$ $n_2 = n_3 = 15$	$n_1 = 80$ $n_2 \neq n_3$	n_i as column 3 $a = 2$	
0			2				
1			500				
2			500				
3			1980				
4			1000				
5			620				
6			390				
7			320				
8			250				

Fonte: (Gielis, 2003).

3 Resultados e Discussões

A presente seção apresentará os resultados das simulações da antena multibanda projetada com a técnica de adição de *patches* e sua posterior otimização para o formato inspirado na geometria de folha de amora.

3.1 Projeto da Antena Multibanda

3.1.1 Cálculo das dimensões dos *patches* e da linha de alimentação da antena multibanda

Antes de realizar a simulação é necessário determinar as dimensões dos *patches* para as frequências de ressonância 0,7, 1,8, 2,6 e 3,5 GHz. Realizando os passos determinados na seção 2.1 deste relatório, as medidas da largura W e do comprimento L de cada *patch*, calculadas para cada frequência de ressonância, podem ser encontradas na Tabela 2.

Tabela 2: Dimensões dos *patches* calculadas para cada frequência de ressonância

Frequência de Ressonância (GHz)	W (mm)	L (mm)
0,7	130,41	102,04
1,8	50,72	39,46
2,6	35,11	27,16
3,5	26,08	20,03

Fonte: (Autora, 2021).

Pela análise da tabela, percebe-se que as medidas W e L do *patch* calculadas para 0,7 GHz, se comparadas às demais medidas, são demasiadamente grandes. Tal *patch*, caso modelado, resultaria em uma estrutura final com proporções muito maiores do que o objetivo, uma vez que o ideal é que tenhamos um projeto com as menores dimensões possíveis.

Dessa forma, para o projeto da antena multibanda, serão utilizados os *patches* modelados para 1,8, 2,6 e 3,5 GHz e, posteriormente, otimizadas as dimensões da estrutura final para compensar a ausência do quarto *patch* e garantir o funcionamento próximo à 0,7 GHz. As dimensões da linha de alimentação foram calculadas considerando a frequência 1,8 GHz, e os valores de W_0 e L_0 encontrados, a partir das equações elencadas na seção 2.1, estão dispostos na Tabela 3.

Tabela 3: Dimensões calculadas da linha de alimentação da antena multibanda

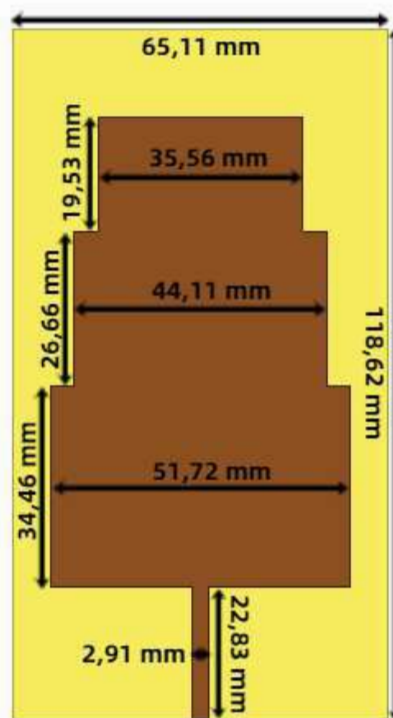
W_0 (mm)	L_0 (mm)
2,91	22,83

Fonte: (Autora, 2021).

3.1.2 Simulação da antena multibanda

Como já discutido, foi projetada e simulada uma antena multibanda utilizando os *patches* com dimensões modeladas para as frequências de ressonância 1,8, 2,6 e 3,5 GHz. Para as simulações da antena, o substrato utilizado foi o FR4 que possui espessura de 1,52 mm, permissividade elétrica relativa $\epsilon_r = 4,4$ e tangente de perdas $\tan \delta = 0,02$. A Figura 5 apresenta o projeto da antena multibanda, bem como suas medidas obtidas após otimização.

Figura 5: Antena multibanda simulada

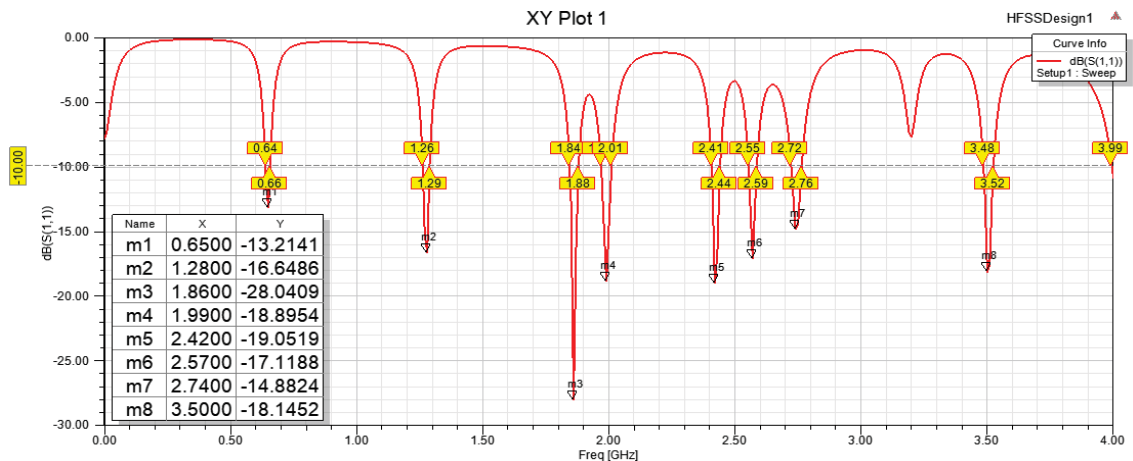


Fonte: (Autora, 2021).

A Figura 6 ilustra o gráfico dos parâmetros S11 obtidos em simulação. A Figura 7 apresenta o gráfico do VSWR. Pela análise dos gráficos, é possível perceber que a antena projetada apresenta $VSWR < 2$ e $S_{11} < -10$ dB para as frequências de 0,65, 1,28, 1,86, 1,99, 2,42, 2,57, 2,74, e 3,50 GHz. Dessa forma, para tais frequências, há um bom casamento de impedância e no mínimo 90% da potência entregue à antena multibanda

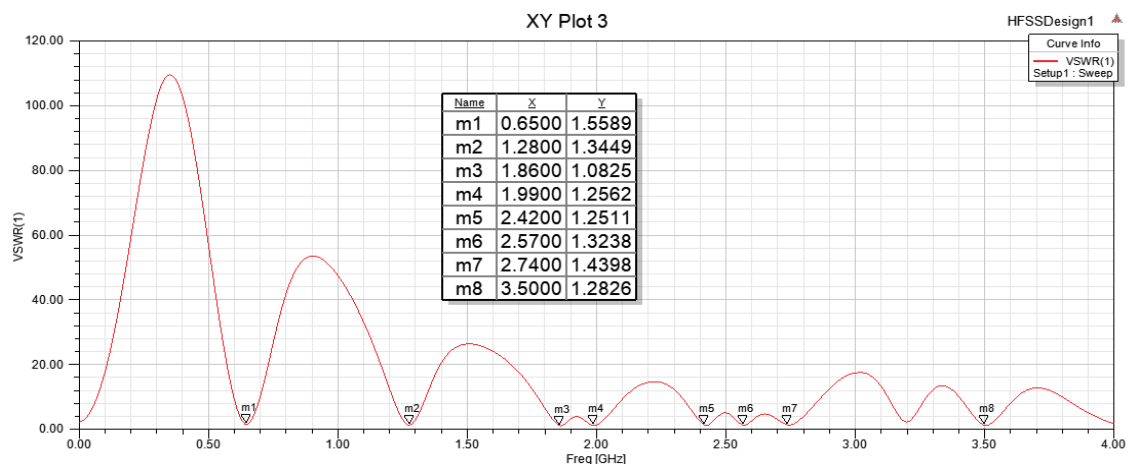
está sendo irradiada para o espaço. O próximo passo é analisar as características da antena operando à 0,65, 1,86, 2,57 e 3,50, pois estão mais próximas das frequências de ressonância que se deseja alcançar.

Figura 6: Gráfico do S11 da antena multibanda



Fonte: (Autora, 2021).

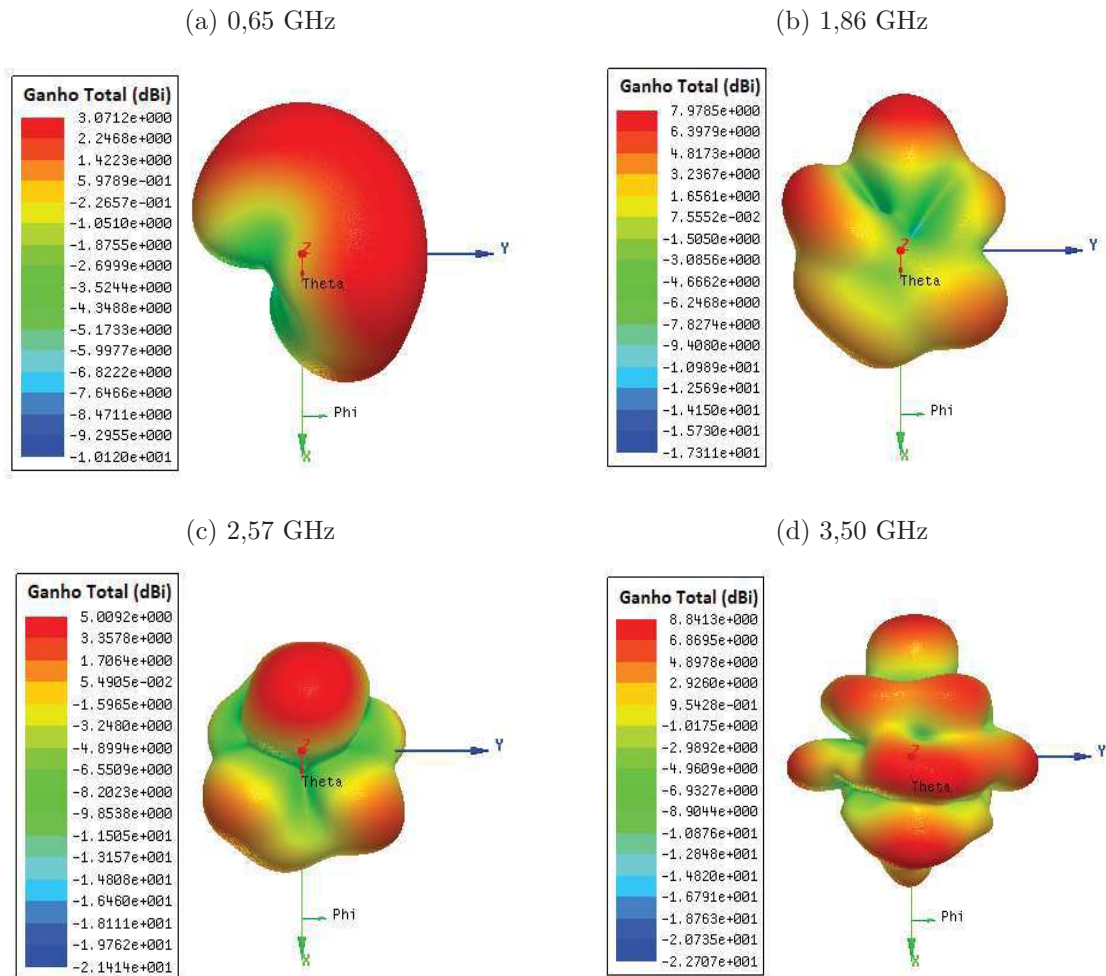
Figura 7: Gráfico do VSWR da antena multibanda



Fonte: (Autora, 2021).

A Figura 8 apresenta os diagramas de irradiação 3D para as frequências de operação 0,65, 1,86, 2,57 e 3,50 GHz, especificamente, cujos ganhos máximos são de 3,07, 7,97, 5,00, 8,84 dBi, respectivamente. A Tabela 4 apresenta a faixa de frequências, a largura de banda e a largura de banda percentual para cada uma dessas frequências de operação. Embora os ganhos possam ser considerados satisfatórios, a antena não é indicada para ser utilizada em aplicações de 4G/LTE e 5G, uma vez que as larguras de banda, em relação às frequências de ressonância, são muito estreitas, o que dificulta a probabilidade de cobertura.

Figura 8: v



Fonte: (Autora, 2021).

Tabela 4: Faixa de Frequências (em GHz), Largura de Banda (em MHz) e a Largura de Banda Percentual para 0,65, 1,86, 2,57 e 3,50 GHz

Frequência Central	Faixa de Frequências	Largura de Banda	BW (%)
0,65 GHz	0,64 - 0,68 GHz	40 MHz	6,15
1,86 GHz	1,84 - 1,88 GHz	40 MHz	2,15
2,57 GHz	2,55 - 2,59 GHz	40 MHz	1,55
3,50 GHz	3,48 - 3,52 GHz	40 MHz	1,14

Fonte: (Autora, 2021).

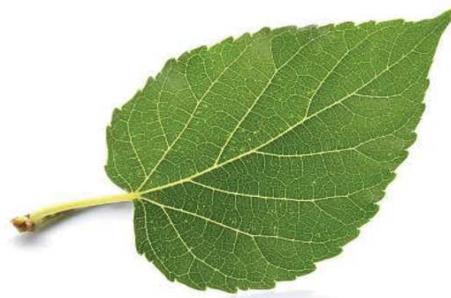
Para superar as limitações de banda, algumas técnicas de projeto precisaram ser empregadas. As possibilidades de alteração nos *patches* das antenas para alargamento de banda são inúmeras. Levando-se em conta essa necessidade de aumento da largura de banda e o fato a antena projetada apresentar um formato muito semelhante ao de uma folha, abriu-se a possibilidade de adaptar a estrutura para um modelo bioinspirado,

técnica que está em maior destaque nos estudos atuais. Dessa forma, o próximo passo foi realizar o projeto de otimização da estrutura com auxílio da superfórmula de Gielis e avaliar os resultados.

3.2 Simulação da antena bioinspirada

A próxima etapa a ser realizada é otimizar a estrutura anteriormente projetada para um formato bioinspirado. As dimensões da antena multibanda simulada irão influenciar na escolha dos parâmetros a e b da superfórmula. Os outros parâmetros m , n_1 , n_2 , n_3 são escolhidos de acordo com o processo de simetria e otimização. As mudanças nos parâmetros fornecem muitas formas diferentes, no entanto, a maioria delas não podem ser utilizadas em projetos de antenas, uma vez que não são nem simétricos nem produtivos. Neste projeto, após uma ampla procura, foi proposto reproduzir o formato da folha de amora (*mulberry leaf*), ilustrada na Figura 9.

Figura 9: Folha de amora



Fonte: (Autora, 2021).

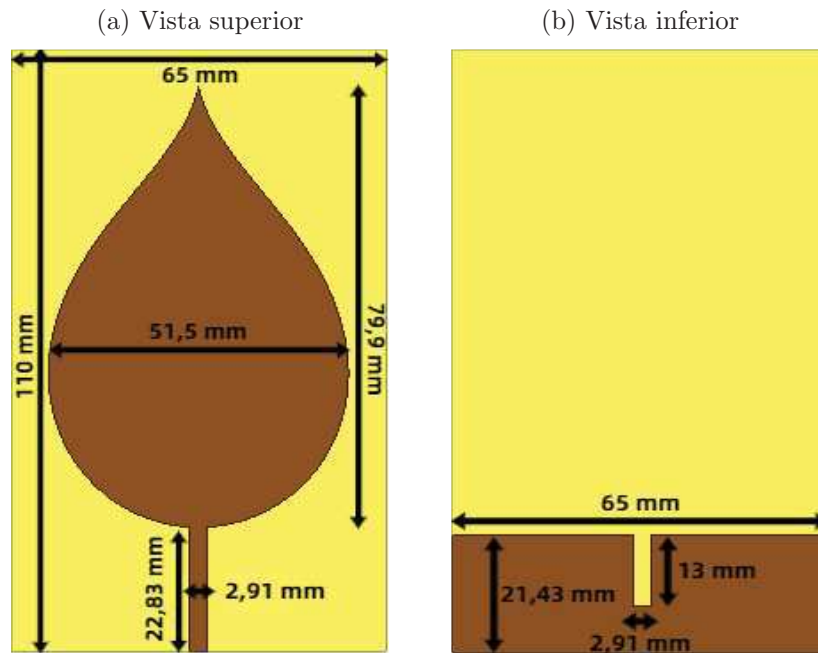
Utilizando o MATLAB®[®], a partir da mudança dos parâmetros da superfórmula de Gielis, encontrou-se a curva que mais se aproximou do formato da folha de amora. Posteriormente, o arquivo foi importado no simulador HFSS (*High Frequency Structure Simulator*) da ANSYS® e acrescentadas as características metálicas do elemento irradiante, além do substrato e plano de terra. O material metálico utilizado no elemento irradiante da antena e no plano de terra foi o cobre com espessura de 0,035 mm. A dimensão da camada dielétrica foi de 110mm x 65mm e espessura de 1,52 mm. Além disso, a permissividade elétrica relativa ϵ_r e a tangente de perdas $\tan\delta$ do substrato utilizado (FR4) são respectivamente, 4,4 e 0,02. Os parâmetros da superfórmula de Gielis (a , b , m , n_1 , n_2 , n_3) utilizados em simulação estão dispostos na Tabela 5. A Figura 10 apresenta a antena bioinspirada projetada. A Figura 11 ilustra um comparativo entre as dimensões da antena multibanda e da antena bioinspirada.

Tabela 5: Parâmetros da superfórmula de Gielis utilizados na simulação

a	b	m	n1	n2	n3
0,08	0,08	1	0,5	0,55	0,55

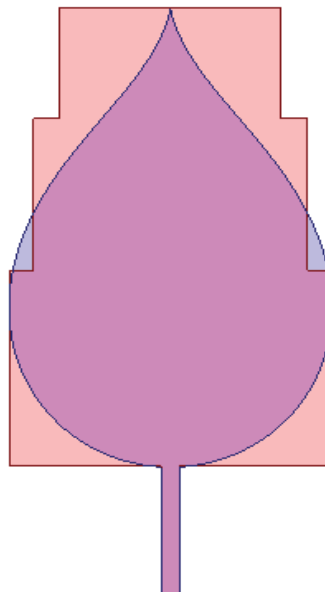
Fonte: (Autora, 2021).

Figura 10: Antena bioinspirada na folha de amora



Fonte: (Autora, 2021).

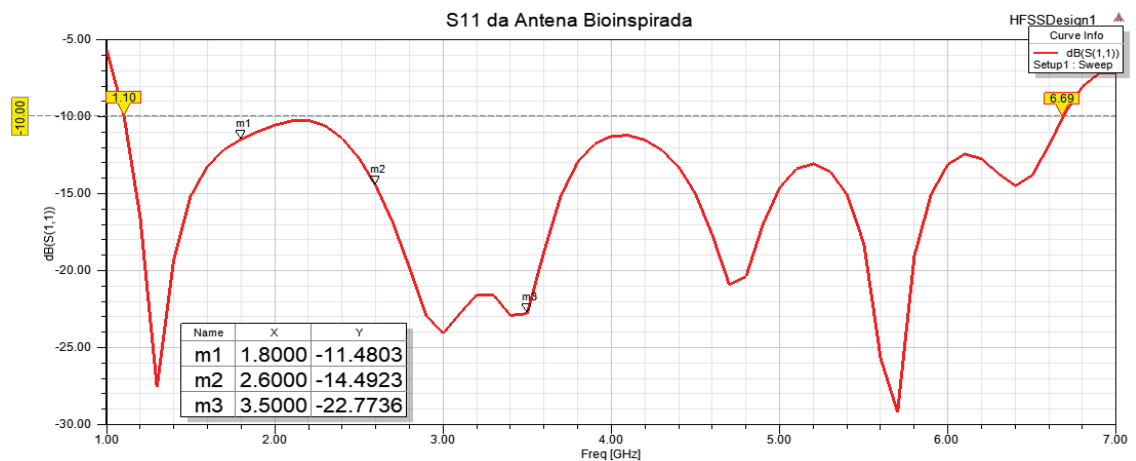
Figura 11: Comparativo entre as dimensões da antena multibanda e a antena bioinspirada



Fonte: (Autora, 2021).

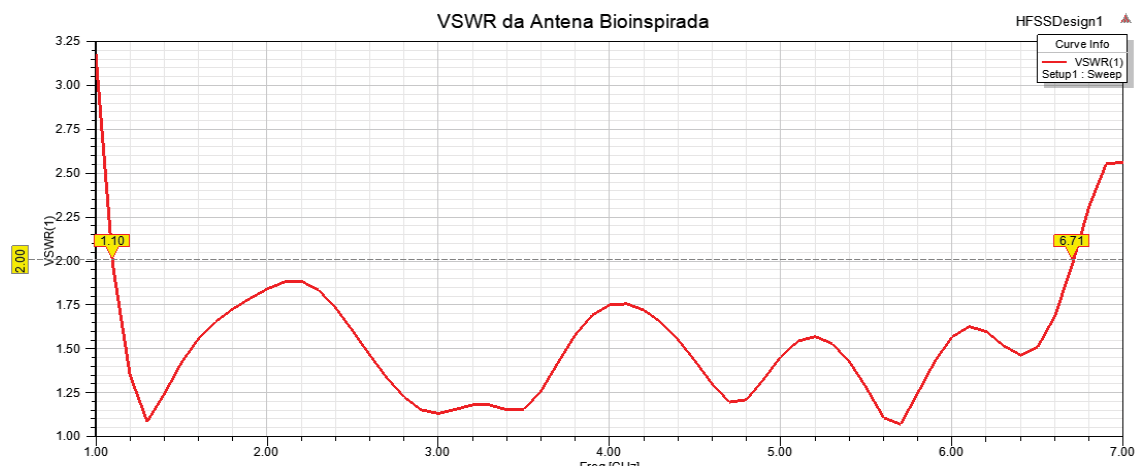
A partir da análise das figuras, é possível perceber que a antena bioinspirada mantém suas proporções muito próximas às proporções da antena multibanda. Assim, a aproximação para o formato da folha de amora, realizada com auxílio da superfórmula, é satisfatória em termos de dimensões. Para este projeto, também é utilizado um plano de terra com truncamento visando aumentar a largura de banda do sinal emitido pela estrutura como sugere (Ali et al, 2018). A Figura 12 apresenta o gráfico do parâmetro S11 da antena bioinspirada, enquanto a Figura 13 ilustra o gráfico do VSWR.

Figura 12: Gráfico do S11 da antena bioinspirada



Fonte: (Autora, 2021).

Figura 13: Gráfico do VSWR da antena bioinspirada



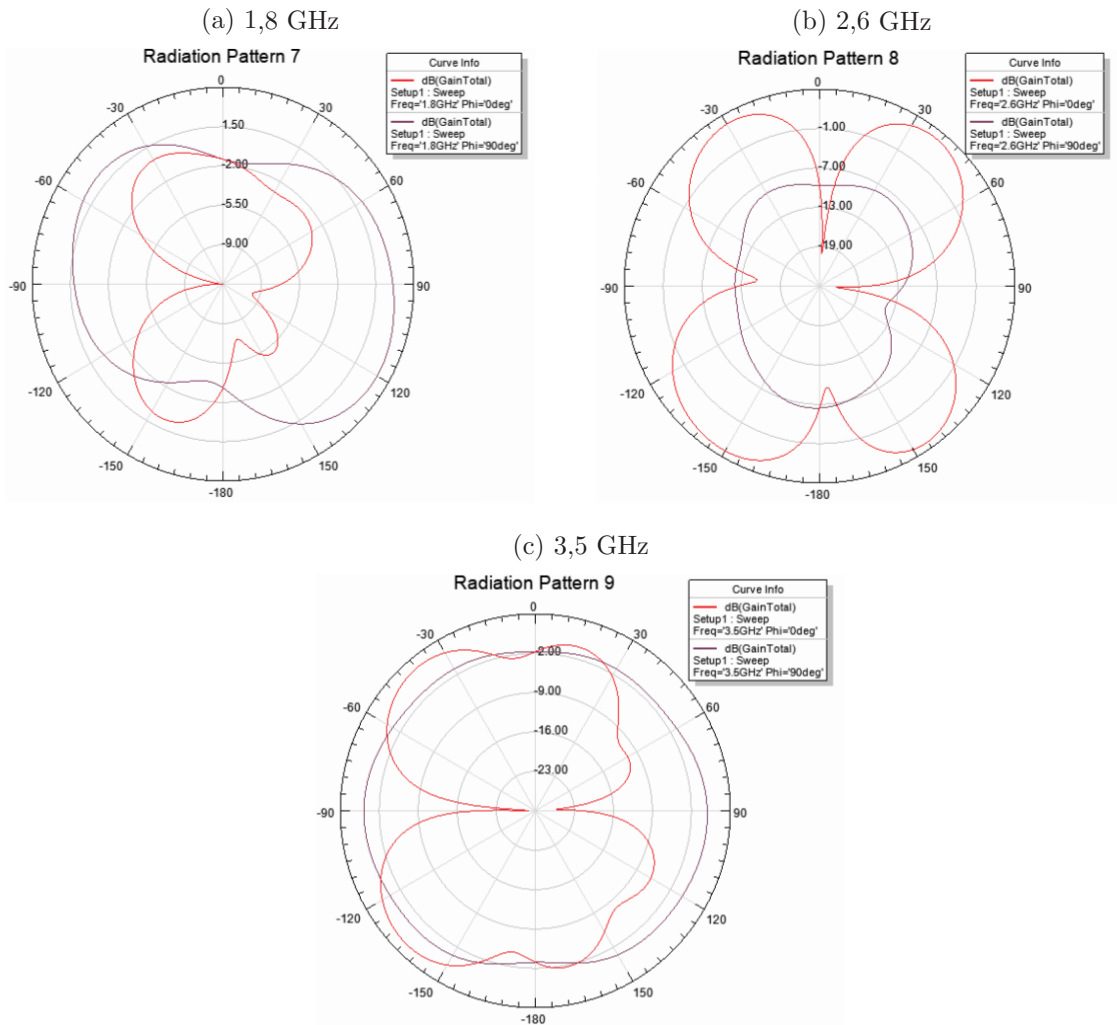
Fonte: (Autora, 2021).

Pela análise dos gráficos é possível perceber que a antena projetada apresenta $VSWR < 2$ e $S_{11} < -10$ dB para frequências que vão de 1,1 à 6,69 GHz. Dessa forma, podemos afirmar que, para essa faixa, há um bom casamento de impedância e que pelo menos 90% da potência entregue a antena será efetivamente irradiada para o espaço. Embora a nova configuração não funcione a 0,7 GHz, houve um aumento significativo na

largura de banda em relação as frequências centrais 1,8, 2,6 e 3,5 GHz, o que é satisfatório.

O próximo passo é analisar a resposta da antena nas frequências 1,8, 2,6 e 3,5 GHz. A Figura 14 apresenta os padrões de irradiação 2D, para o plano de elevação ($\phi = 0^\circ$) e para o plano azimutal ($\theta = 90^\circ$), nas frequências 1,8, 2,6 e 3,5 GHz, respectivamente.

Figura 14: Padrões de irradiação 2D da antena bioinspirada na folha de amora, para o plano de elevação ($\phi = 0^\circ$) e para o plano azimutal ($\theta = 90^\circ$), operando em 1,8, 2,6 e 3,5 GHz, respectivamente, expressos em função do ganho total.



Fonte: (Autora, 2021).

Analisando os padrões de irradiação 2D é possível perceber que a antena tem comportamento aproximadamente omnidirecional para as três frequências estudadas. Assim, a antena bioinspirada consegue transmitir o sinal em 360° , sendo ideal para as comunicações sem fio. A Figura 15 ilustra os padrões de irradiação 3D, nas frequências 1,8, 2,6 e 3,5 GHz, respectivamente. A eficiência da antena para cada frequência está disposta na Tabela 6.

Figura 15: Padrões de irradiação 3D da antena bioinspirada na folha de amora, operando em 1,8, 2,6 e 3,5 GHz, respectivamente, expressos em função do ganho total.

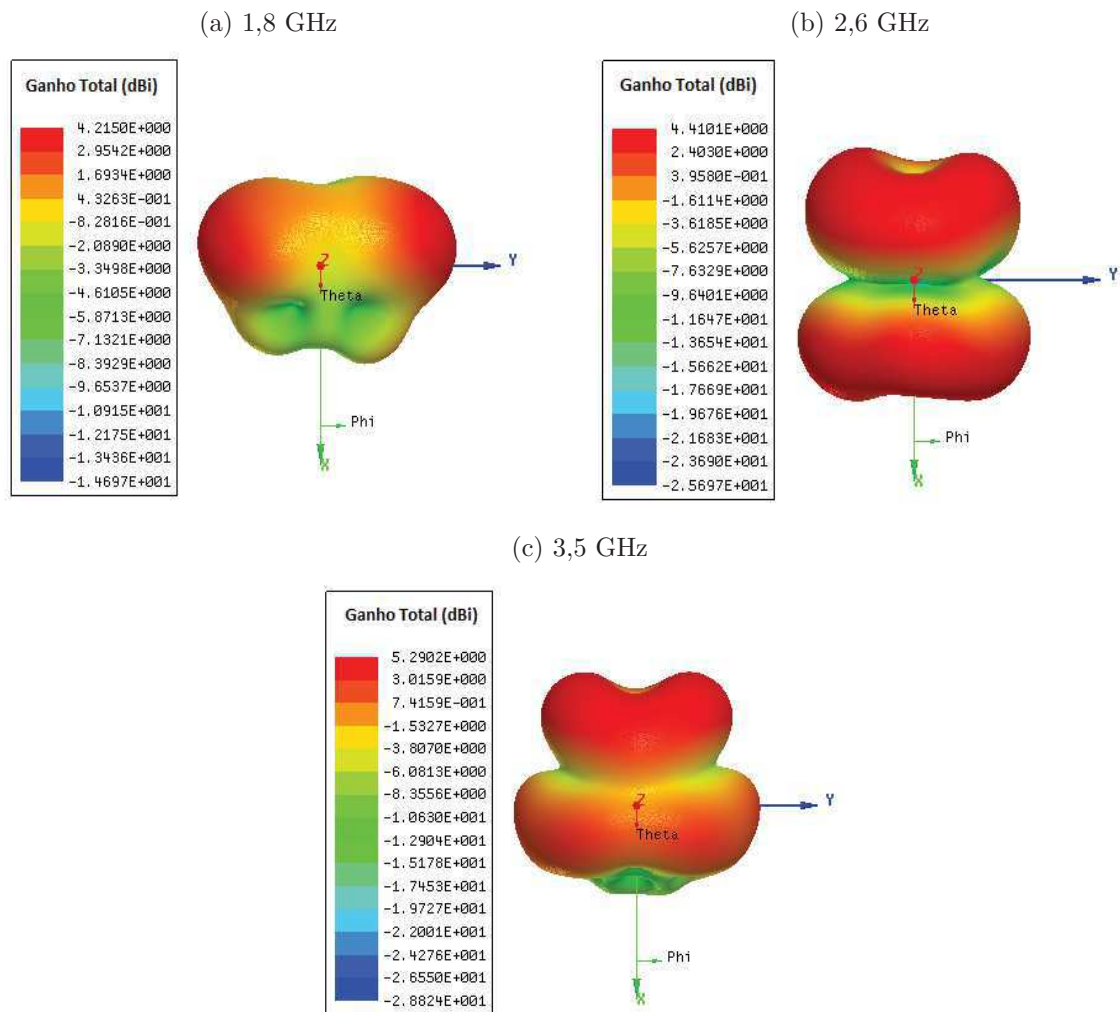


Tabela 6: Eficiência da antena

Frequência de Ressonância (GHz)	Eficiência (%)
1,8	94,24
2,6	96,32
3,5	95,94

Fonte: (Autora, 2021).

Para as frequências de ressonância de 1,8, 2,6 e 3,5 GHz, o ganho máximo da antena é 4,21, 4,41 e 5,59 dBi, respectivamente, o que é considerado satisfatório. Além disso, há uma boa eficiência da antena nas frequências referenciadas. Dessa forma, a antena proposta pode ser utilizada em aplicações 4G/LTE à 1,8 e 2,6 GHz e 5G à 3,5 GHz com bom desempenho.

4 Conclusão e Proposta para Trabalhos Futuros

No trabalho desenvolvido foi realizada uma revisão bibliográfica dos conceitos que envolvem a técnica de adição de *patches* para projeto de antenas multibanda, bem como um estudo da superfórmula de Gielis e antenas bioinspiradas.

Em seguida foram feitas as simulações da antena multibanda projetada com a adição de três *patches* e, posteriormente, a otimização dessa antena para um modelo bioinspirado na geometria da folha de amora.

Avaliando os resultados do padrão de irradiação 2D e 3D, VSWR, parâmetro S11 e eficiência, percebeu-se que a estrutura proposta é muito atrativa, devido à sua simplicidade, baixo custo, volume reduzido e funcionamento banda larga, evidenciando o potencial da geometria bioinspirada para aplicação multibanda nas tecnologias 4G/LTE e 5G, finalizando, assim, o projeto de conclusão de curso.

Para trabalhos futuros, sugere-se a fabricação da antena bioinspirada de forma a validar experimentalmente os resultados obtidos em simulação, aplicação de outras técnicas de otimização que possam permitir que a antena funcione a 0,7 GHz, bem como investigar a eficácia de outros formatos bioinspirados.

Referências Bibliográficas

- PANWAR, N.; SHARMA, S.; SINGH, A.K. A survey on 5G: The next generation of mobile communication. *Phys. Commun.* 2016, 18, 64–84.
- RUSMONO, Efri Sandi; MARANI, Teresa. Design of Multiband MIMO Antenna for 5G Millimeterwave Application. In: *IOP CONFERENCE SERIES: MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING*. 2. ed. Indonesia. 2019.
- ULU, Eda ; BARDAK, Cemile. Microstrip Patch Antenna Design Using The Superformula . In: *2ND INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRICAL, COMMUNICATION AND COMPUTER ENGINEERING (ICECCE)*, Istambul, 2020.
- BALANIS, C. A. *Antenna Theory: analysis and design*. 4. ed. New Jersey: John Wiley e Sons, Inc., 2005.
- DE OLIVEIRA, Maciel Alves et al. Patch Antenna Bio-inspired on Wayfaring-tree (*Viburnum lantana*) for Applications in 2.4 GHz. In: *2017 SBMO/IEEE MTT-S INTERNATIONAL MICROWAVE AND OPTOELECTRONICS CONFERENCE (IMOC)*. 2017, Aguas de Lindoia, Brazil.
- GIELIS, Johan. A Generic Geometric Transformation That Unifies a Wide Range of Natural and Abstract Shapes. *American Journal of Botany*, v. 90, n. 3, p. 333-338, Março 2003.
- SERRES, Alexandre Jean René et al, “Bio-Inspired Microstrip Antenna,” *Trends Res. Microstrip Antennas*, 2017.
- SRIVASTAVA, Kunal; KUMAR, Ashwani; KANAUIA, Binod K.. Design of Compact Penta-Band and Hexa-Band Microstrip Antennas, v. 70, n. 3-4, 12 fevereiro 2016.
- ALI, Tanweer et al. A compact decagonal-shaped UWB monopole planar antenna with truncated ground plane. *Microwave and Optical Technology Letters*, v. 60, 30 outubro 2018.