



Universidade Federal de Campina Grande

Centro de Engenharia Elétrica e Informática

Departamento de Engenharia Elétrica e Informática

Ícaro Modesto Granja Aguiar

**Projeto de uma Antena Bioinspirada
para 5G na Frequência de 3,5 GHz**

Campina Grande, Paraíba

Novembro de 2024

**Projeto de uma Antena Bioinspirada
para 5G na Frequência de 3,5 GHz**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à
Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica
da Universidade Federal de Campina Grande
como parte dos requisitos necessários para a
obtenção do grau de Bacharel em Ciências no
Domínio da Engenharia Elétrica.

Ícaro Modesto Granja Aguiar

Orientando

Prof^o. Dr. Raimundo Carlos Silvério Freire

Orientador

Campina Grande, Paraíba

Novembro de 2024

*Dedico este trabalho a meus pais, Klaudy e Hermógenes,
por todos os anos dedicados a minha educação.
Sem eles esse último ato da minha graduação não seria possível.*

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço aos meus pais, Klaudy e Hermógenes, que abdicaram de tanto para que os meus sonhos se tornassem realidade, me sustentaram quando as minhas pernas falharam e me deram mais do que eu serei capaz de um dia retribuir.

Um agradecimento mais que especial a Duda, por todos os momentos divertidos, pudins e cortes de barba ao longo desse ano. Sem ela esse trabalho não seria realizado.

Agradeço ao meu irmão, Iago, por ser um companheiro fiel e leal nas horas mais difíceis e a meu sobrinho, Davi, pelos sorrisos nos momentos em que estive mais triste e pelas noites de café e jogos.

Agradeço a João e Duda, que enquanto estive longe de casa, foram a minha família em Campina Grande.

Agradeço aos meus avós, Maria, Mário (*in memoriam*), Socorro e Juvany, pelo amor e pelos cuidados despendidos a mim durante toda a minha vida.

Agradeço ao meu tio e padrinho, Klayton, e meu tio Nelson (*in memoriam*) pelos conhecimentos passados, histórias engraçadas e músicas cantadas ao longo de todos esses anos.

Agradeço a todos os meus tios e tias, que são muitos para citar, pelo apoio incondicional e pelo carinho em todos esses anos.

Agradeço ao meu orientador, Raimundo Freire, por ter me recebido em seu laboratório e permitido a realização desse trabalho.

Agradeço a minha orientadora, Georgina Karla, pelo acolhimento e paciência ao longo do curso e desse estágio.

Agradeço a professora Alana Ramos, responsável pela minha última aula de graduação, pelos conselhos que ela me deu e por tornar o meu último período muito mais divertido, leve e tranquilo.

Agradeço aos meus amigos de laboratório, em especial, Henrique, Sávio, Sueldo, Thiago César e meus pupilos, José Henrique e Natanael, pela indispensável ajuda e inseparável companhia, sem as quais não seria possível a realização desse estágio.

RESUMO

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de uma antena bioinspirada para aplicações em redes 5G, especificamente projetada para operar na frequência de 3,5 GHz. Utilizando a Superfórmula de Gielis, que permite a geração de formas complexas baseadas em geometrias encontradas na natureza, a antena foi projetada para otimizar características como largura de banda e eficiência de radiação. O estudo envolve a comparação entre uma antena convencional de patch e a antena bioinspirada desenvolvida, utilizando simulações e medições experimentais para avaliar o desempenho. Os resultados demonstram que a antena bioinspirada não apenas atende aos requisitos de operação na faixa do 5G, mas também oferece uma largura de banda significativamente maior, um acréscimo de 325% em relação a antena Patch, e um compromisso eficaz entre ganho e diretividade em comparação com modelos tradicionais.

Palavras-chave: Antena bioinspirada, 5G, Geometrias naturais, Superfórmula de Gielis, Engenharia de telecomunicações.

ABSTRACT

This work presents the development of a bioinspired antenna for 5G network applications, specifically designed to operate at a frequency of 3.5 GHz. Using Gielis' Superformula, which allows the generation of complex shapes based on geometries found in nature, the antenna was designed to optimize characteristics such as bandwidth and radiation efficiency. The study involves a comparison between a conventional patch antenna and the developed bioinspired antenna, using simulations and experimental measurements to evaluate performance. The results demonstrate that the bioinspired antenna not only meets the operational requirements for the 5G band but also offers significantly greater bandwidth, with a 70% increase compared to the patch antenna, and an effective balance between gain and directivity compared to traditional models.

Keywords: Bioinspired antenna, 5G, Natural geometries, Gielis Superformula, Telecommunications engineering.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Representação da Largura de Banda de uma Antena.....	17
Figura 2	Exemplo de um Diagrama de Radiação 2D.	18
Figura 3	Exemplo de um Diagrama de Radiação 3D de uma Antena Espiral.....	19
Figura 4	Dimensões da Antenas Projetadas, a): Patch e b) Bioinspirada.	23
Figura 5	S_{11} da antena Patch.....	24
Figura 6	S_{11} da antena Bioinspirada.	24
Figura 7	Diagrama de Radiação da antena Patch.....	25
Figura 8	Diagrama de Radiação da antena Bioinspirada.	25

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Formas Geradas usando a Expressão de Gielis.....	21
----------	--	----

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
2	OBJETIVOS	11
2.1	Objetivo Principal	11
2.2	Objetivos Específicos	11
3	ESTADO DA ARTE	11
3.1	A Bioinspiração no Design de Antenas	12
3.2	Avanços no Projeto de Antenas para Aplicações em 5G	12
3.3	Avanços na Simulação e Fabricação de Antenas	13
3.4	Exemplos e Aplicações	14
4	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	14
4.1	Diretividade e Ganho	15
4.1.1	Largura de Banda	16
4.2	Diagrama de Radiação	17
4.3	Superfórmula de Gielis	19
5	RESULTADOS	22
6	CONCLUSÃO	25
	REFERÊNCIAS	27

1 INTRODUÇÃO

A crescente demanda por tecnologias de comunicação de alta velocidade e baixa latência impulsionou, nas últimas décadas, o desenvolvimento de diversas soluções no campo da engenharia elétrica e das telecomunicações. Com o surgimento da tecnologia 5G, novas aplicações foram projetadas para ampliar as capacidades de transmissão de dados, reduzir o tempo de resposta e aumentar a densidade de dispositivos conectados por área. Este avanço, que tem revolucionado setores como a internet das coisas (IoT), cidades inteligentes e veículos autônomos, exige também melhorias substanciais nos sistemas de antenas, pois são elas que garantem a qualidade e eficiência da transmissão e recepção de dados. Nesse contexto, o projeto de antenas bioinspiradas surge como uma alternativa eficaz para atender às especificações exigidas pela tecnologia 5G.

As redes de comunicação de quinta geração (5G) operam majoritariamente em frequências mais altas, permitindo velocidades de transmissão de dados significativamente superiores às das gerações anteriores. A frequência de 3,5 GHz, utilizada neste projeto, é uma das bandas principais para o 5G, oferecendo um equilíbrio entre alcance e capacidade de transmissão, o que a torna ideal para cenários urbanos densamente povoados. No entanto, operar nessa faixa de frequência apresenta desafios técnicos específicos que demandam inovações na concepção das antenas.

As antenas convencionais, que utilizam formatos e configurações geométricas tradicionais, apresentam algumas limitações para atender aos requisitos cada vez mais exigentes de miniaturização, largura de banda e eficiência. Dessa forma, o conceito de bioinspiração no design de antenas surgiu como uma solução para otimizar esses parâmetros, uma vez que permite o aproveitamento de estruturas geométricas e estratégias de design encontradas na natureza. O estudo da forma e disposição das folhas, dos padrões de ramificação e de outras estruturas naturais, para otimizar as propriedades eletromagnéticas das antenas, tem ajudado na construção de antenas mais eficientes, compactas e de alta performance, adequadas para aplicações em ambientes complexos e desafiadores, como os urbanos.

A escolha pela bioinspiração se justifica, além disso, pelo potencial de integração com técnicas avançadas de fabricação, como a impressão 3D e o uso de materiais flexíveis, que permitem o desenvolvimento de antenas mais leves e adaptáveis. Esses aspectos são

de grande importância para dispositivos móveis, vestíveis e para sistemas embarcados em veículos, onde o espaço e a eficiência energética são fatores limitantes. Ademais, as antenas bioinspiradas têm mostrado resultados promissores na redução dos lóbulos secundários, o que diminui as interferências indesejadas e aumenta a diretividade, características que favorecem a estabilidade e a confiabilidade das comunicações em redes de alta densidade, como as redes 5G.

O presente trabalho tem como objetivo principal o desenvolvimento de uma antena bioinspirada projetada para operar na frequência de 3,5 GHz. Para alcançar esse objetivo, será realizado um levantamento bibliográfico aprofundado sobre a utilização da bioinspiração no design de antenas, com destaque para o uso da Superfórmula de Gielis, uma expressão matemática que permite a criação de formas geométricas complexas inspiradas em elementos naturais. Esse levantamento fornecerá a base teórica necessária para a concepção da antena e servirá como guia para a escolha das melhores práticas no processo de fabricação.

Especificamente, o trabalho pretende:

1. Estudar a aplicação da Superfórmula de Gielis para a geração da forma bioinspirada, com foco em uma estrutura baseada em folhas elípticas, buscando otimizar a largura de banda e a eficiência da antena.
2. Comparar o desempenho da antena bioinspirada com uma antena patch convencional, utilizando o substrato FR-4, amplamente empregado na fabricação de antenas para comunicações sem fio.
3. Realizar simulações para avaliar parâmetros críticos, como o ganho, o coeficiente de reflexão e o diagrama de radiação, de modo a ajustar o design da antena bioinspirada para atender às necessidades do 5G.

O trabalho está organizado em capítulos que abordam inicialmente a fundamentação teórica e o estado da arte sobre o uso de algoritmos bioinspirados e técnicas de simulação no desenvolvimento de antenas. Em seguida, é descrito o processo metodológico adotado para o projeto e fabricação da antena, com detalhamento das etapas de simulação. Por fim, são apresentados os resultados experimentais e as conclusões, que discutem as vantagens e as limitações do uso da bioinspiração no design de antenas para 5G e possíveis caminhos para futuras pesquisas.

Assim, este trabalho busca contribuir com o avanço das tecnologias de antenas para redes de comunicação de última geração, oferecendo uma abordagem moderna e sus-

tentável para o design de antenas que alia eficiência, miniaturização e estética. Através da aplicação de conceitos bioinspirados, espera-se que o projeto desenvolvido possa não apenas atender às demandas técnicas do 5G, mas também servir como um ponto de partida para o desenvolvimento de antenas aplicáveis em diferentes contextos de comunicação sem fio.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Principal

Desenvolvimento de uma antena bioinspirada para 5G na frequência de 3,5 GHz.

2.2 Objetivos Específicos

- Realizar o Levantamento Bibliográfico sobre o uso da Bioinspiração no Desenvolvimento de Antenas;
- Estudar o uso da Fórmula de Gielis para a Geração da Forma Bioinspirada da Folha Elíptica;
- Projeto de uma Antena Patch para usar como Comparação;
- Projetar e Simular a Antena Proposta.

3 ESTADO DA ARTE

O desenvolvimento de tecnologias de comunicação sem fio, especialmente com a introdução do 5G, tem estimulado um intenso interesse em métodos mais avançados para o projeto e fabricação de antenas. As antenas bioinspiradas, que utilizam formas encontradas na natureza como base para suas estruturas, surgiu como uma das alternativas para atender as exigências de desempenho e eficiência necessárias nesta nova era de comunicação. O presente estado da arte concentra-se na análise de antenas bioinspiradas para a frequência de 3,5 GHz, que é amplamente usada nas redes 5G [Debaenst et al. 2020].

3.1 A Bioinspiração no Design de Antenas

A bioinspiração se refere ao conceito de observar e estudar a natureza para extrair princípios, estratégias, e designs na tentativa de criar soluções para os problemas humanos. Este enfoque tem sido utilizado com sucesso na engenharia, proporcionando avanços em diversas áreas, inclusive no design de antenas. Estruturas encontradas em seres vivos, como a forma das asas de insetos ou a disposição das folhas em certas plantas, têm sido amplamente utilizadas em designs de antenas [Santos et al. 2009].

A geometria da antena é de grande importância para a otimização da radiação das antenas e a maximização do ganho em faixas específicas de frequência. Um estudo sobre antenas projetadas com base em formas biomiméticas revela como essas estruturas podem melhorar significativamente a eficiência em comparação com as antenas tradicionais [Santos et al. 2009].

No design de antenas, a aplicação de algoritmos bioinspirados, como os Algoritmos Genéticos [Dejen et al. 2023], tem se mostrado eficaz. Esses algoritmos podem simular processos evolutivos naturais, permitindo a otimização de parâmetros do projeto para obter antenas com características desejáveis. Estudos demonstram que o uso de algoritmos de otimização pode levar a uma maior eficiência no uso do espaço e na adaptação a diferentes frequências, características essenciais para dispositivos que operam em 5G [Abolade, Konditi e Dharmadhikary 2021, Santos et al. 2009].

Outro método utilizado no design de antenas bioinspiradas é a Superfórmula de Gielis [Melchiorre et al. 2020]. A Superfórmula pode ser utilizada para desenvolver estruturas que capturam as propriedades de radiação desejadas. Por exemplo, a geometria derivada da Superfórmula pode ajudar a maximizar o ganho e a eficiência da radiação em antenas. Ao empregar estas formas, é possível não apenas melhorar o desempenho das antenas, mas também obter dimensões menores de design que podem ser esteticamente agradáveis e integradas em dispositivos móveis e vestíveis.

3.2 Avanços no Projeto de Antenas para Aplicações em 5G

Com a introdução do 5G, a frequência de 3,5 GHz se tornou uma das mais relevantes, permitindo transmissões rápidas e estáveis em ambientes urbanos densamente povoados. Essa frequência é muito importante, pois equilibra a cobertura e a capacidade

de dados, atendendo à crescente demanda por conectividade em um mundo cada vez mais interinterligado [Azam et al. 2024]. As redes 5G exigem antenas que não apenas cubram essa faixa de frequência, mas que também sejam compactas e de baixo custo de fabricação.

Pesquisas recentes têm explorado a utilização de estruturas multi-banda e técnicas de alimentação, como as alimentações assimétricas, que permitem que as antenas operem eficientemente em múltiplas faixas de frequência. Um exemplo notável é o desenvolvimento de uma antena compacta que opera em seis bandas distintas, mostrando grande adaptabilidade e eficiência em aplicações 5G [Abolade, Konditi e Dharmadhikary 2021].

Os materiais utilizados nas antenas bioinspiradas também desempenham um papel crucial em seu desempenho. O uso de substratos flexíveis e materiais têxteis tem sido amplamente estudado, permitindo a fabricação de antenas que são não apenas funcionais, mas que também podem ser integradas a roupas e dispositivos vestíveis [Colaco e Cotta 2022]. Várias pesquisas exploram como antenas vestíveis podem ser projetadas para operar eficientemente nas bandas de 2G a 5G, adequando-se a uma ampla gama de aplicações modernas.

3.3 Avanços na Simulação e Fabricação de Antenas

A simulação computacional desempenha um papel fundamental no desenvolvimento de antenas bioinspiradas. O uso de softwares permite a análise detalhada do comportamento eletromagnético das antenas, permitindo ajustes precisos no design antes da fabricação [Lee e Chen 1997]. As simulações têm mostrado resultados promissores no design de antenas, como documentado por DA SILVA SANTOS e outros (2009), que aplicaram métodos de otimização dinâmica para maximizar o desempenho de antenas de microfita.

Além disso, a fabricação dessas antenas utilizando técnicas como impressão 3D [Bjorgaard et al. 2018] e máquinas a laser [Masihi et al. 2020], tem facilitado a realização de designs complexos que seriam difíceis de produzir com métodos tradicionais. Essa inovação não apenas apressa a produção, mas também permite a criação de formas mais intrincadas e eficientes, alinhadas com o princípio de bioinspiração.

3.4 Exemplos e Aplicações

Diversos estudos de caso exemplificam os avanços das antenas bioinspiradas. Em um trabalho recente, foi apresentada uma antena compacta com base na geometria de um padrão natural que demonstrou desempenho excepcional em banda larga, revelando os benefícios da bioinspiração na engenharia de antenas modernas [Abolade, Konditi e Dharmadhikary 2021, Santos et al. 2009]. Antenas bioinspiradas são usadas em sistemas de comunicação sem fio [Abolade, Konditi e Dharmadhikary 2020, Abolade, Konditi e Dharmadhikary 2021, Sarma, Inthiyaz e Madhav 2023], na detecção de descargas parciais [Ardila-Rey et al. 2024, Xavier et al. 2019], no monitoramento de atividades celulares [Kong et al. 2014], em aplicações que envolvam o monitoramento da saúde, bem-estar, esportes, e de características físicas, psicológicas e bioquímicas [Colaco e Cotta 2022, Lo et al. 2012], só para citar algumas.

4 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

As antenas são componentes essenciais nas telecomunicações, atuando como interface entre os circuitos eletrônicos e o espaço livre. De acordo com o IEEE [Balanis 2016], elas são definidas como dispositivos que irradiam ou captam ondas de rádio. Essa capacidade de converter sinais elétricos em ondas eletromagnéticas e vice-versa permite a transmissão de dados por meio de diversas tecnologias sem fio, como Wi-Fi, redes celulares e comunicação via satélite.

A geometria e os materiais utilizados na construção das antenas influenciam diretamente suas características de radiação, como ganho, largura de banda e diretividade [Balanis 2016]. A pesquisa nessa área busca constantemente desenvolver novas antenas com melhores desempenhos, capazes de operar em diferentes faixas de frequência e em ambientes complexos.

O desempenho de uma antena é determinado por um conjunto de parâmetros que definem suas características de radiação. Entre os principais, destacam-se o ganho, a diretividade, a largura de banda, impedância, o diagrama de radiação e a polarização. A compreensão desses parâmetros é essencial para a escolha e o uso adequado de antenas em diferentes aplicações.

4.1 Diretividade e Ganho

Diretividade e ganho são parâmetros fundamentais no estudo e desenvolvimento de antenas, especialmente no que diz respeito à sua eficiência e desempenho na transmissão ou recepção de sinais. A diretividade [Mikki, Clauzier e Antar 2019] de uma antena é uma medida que reflete a extensão em que a antena é capaz de concentrar energia emitida em uma direção específica, em comparação com uma fonte isotrópica ideal, que irradiaria igualmente em todas as direções. Essa característica é crucial em muitas aplicações, especialmente em sistemas de comunicação, onde a concentração de energia em uma direção específica pode aumentar significativamente a eficiência do sistema.

Para compreender a diretividade, é essencial considerar que uma antena com alta diretividade é capaz de focalizar energia de forma mais eficaz, reduzindo a dispersão para outras direções. Esse parâmetro é expresso como a razão entre a intensidade de radiação na direção de ganho máximo e a intensidade média de radiação emitida por uma antena isotrópica. Portanto, a diretividade é uma medida puramente geométrica, relacionada à forma e ao padrão de radiação da antena, sem levar em conta as perdas que podem ocorrer no sistema. A fórmula para calcular a diretividade (D) é dada por:

$$D = \frac{4\pi U}{P_r}. \quad (4.1)$$

Nesta equação, U representa a intensidade de radiação máxima na direção de maior ganho, enquanto P_r corresponde à potência total irradiada pela antena. O ganho, por sua vez, está diretamente relacionado à eficiência da antena. Ele é definido como o produto da diretividade e da eficiência de radiação da antena. O ganho considera tanto a capacidade de concentração de energia em uma direção específica (medida pela diretividade) quanto as perdas internas da antena, como as causadas por resistências nos materiais e outros fatores de dissipação de energia. Assim, o ganho total de uma antena é o resultado da combinação de diretividade e eficiência, fornecendo uma visão mais abrangente do desempenho da antena em termos de capacidade de transmissão ou recepção de sinal. Em termos matemáticos, a relação entre ganho e diretividade pode ser expressa pela fórmula:

$$G = \eta D. \quad (4.2)$$

em que G representa o ganho e η a eficiência da antena. Essa equação demonstra que, mesmo que uma antena possua alta diretividade, seu ganho será reduzido se houver perdas significativas no sistema devido à baixa eficiência de radiação.

4.1.1 Largura de Banda

A largura de banda define a faixa de frequências em que a antena pode operar de maneira eficiente, sem que haja degradação significativa no desempenho. Em termos gerais, a largura de banda de uma antena é a diferença entre as frequências mínima e máxima dentro de um intervalo de operação em que a antena mantém um desempenho aceitável, como bons níveis de impedância, ganho e radiação. A largura de banda (BW) pode ser denotada pela equação:

$$BW = f_{max} - f_{min}. \quad (4.3)$$

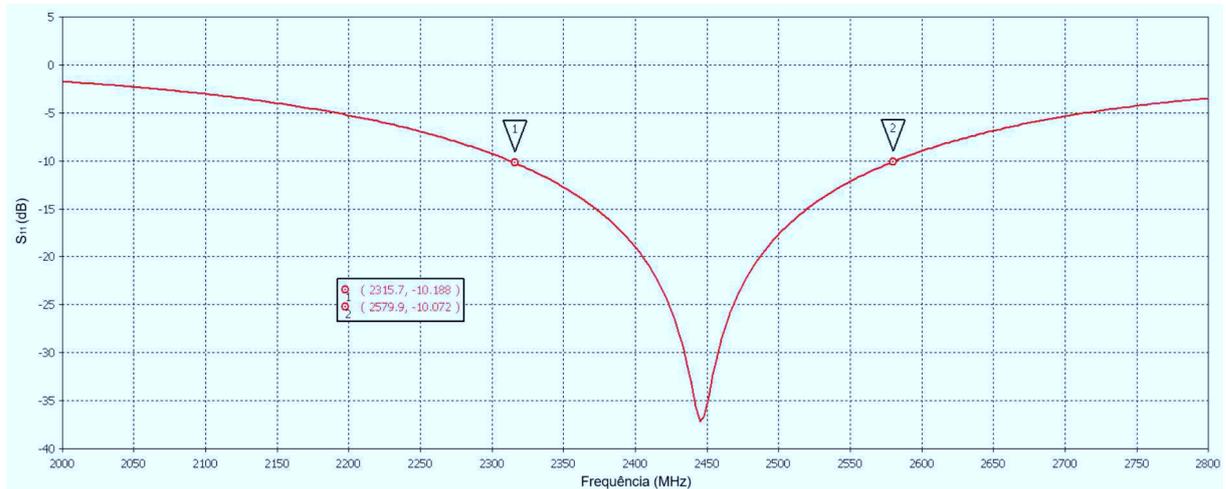
em que f_{max} e f_{min} são, respectivamente, as frequências máxima e mínima dentro das quais a antena opera dentro de um determinado critério de desempenho, geralmente definido como uma perda de retorno aceitável.

A largura de banda pode ser afetada por diversos fatores. A geometria da antena, o tipo de material utilizado, a proximidade de outros elementos radiantes ou objetos metálicos, e até mesmo o ambiente no qual a antena é instalada, são aspectos que podem influenciar a largura de banda. Por exemplo, antenas de patch, devido à sua construção com materiais dielétricos, geralmente têm uma largura de banda mais restrita, enquanto dipolos e antenas de loop, que possuem estruturas mais simples, apresentam maiores largura de banda.

O desempenho da antena em diferentes larguras de banda é frequentemente ilustrado por gráficos de resposta em frequência, onde se pode visualizar a queda no ganho ou no nível de eficiência à medida que a antena se desvia da sua frequência central de operação. A largura de banda ideal de uma antena é, assim, um compromisso entre a diretividade, ganho e as necessidades específicas do sistema para o qual ela está sendo projetada. Na Figura 1 pode ser visto um exemplo da representação da largura de banda de uma antena.

Nesse exemplo a largura de banda é calculada a partir do coeficiente de reflexão, S_{11} , e o critério de operação escolhido foi que a antena deveria ter um S_{11} de pelo menos -10 dB. Para esse caso a frequência inferior é de $2315,7$ MHz e a frequência superior é de $2579,9$ MHz, resultando em uma largura de banda de $264,2$ MHz.

Figura 1: Representação da Largura de Banda de uma Antena.



Ezurio, 2024.

4.2 Diagrama de Radiação

O diagrama de radiação de uma antena é uma representação gráfica tridimensional ou bidimensional que descreve como a energia eletromagnética irradiada pela antena se distribui no espaço. Esse diagrama é fundamental no estudo e na fabricação de antenas, pois permite visualizar e entender as características do padrão de radiação em diferentes direções, ajudando a avaliar o desempenho da antena em termos de cobertura e eficiência.

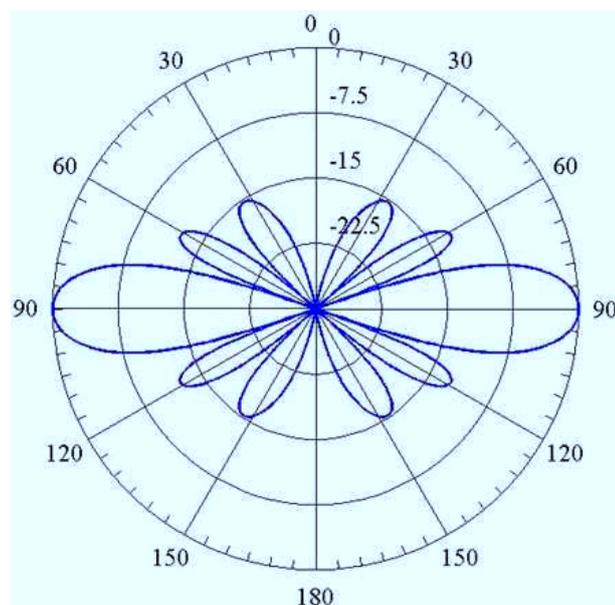
Em termos práticos, o diagrama de radiação pode ser representado em dois planos principais: o plano horizontal e o plano vertical. No plano horizontal, o diagrama revela como a antena distribui energia em torno de si em uma linha reta no nível do solo, o que é especialmente útil para sistemas de comunicação em que a cobertura ao longo de uma superfície plana é crítica, como em torres de telecomunicação. No plano vertical, o diagrama mostra como a antena irradia em direções acima e abaixo dela, o que é essencial para avaliar a altura de cobertura e a propagação em sistemas como os de comunicação por satélite.

A forma do diagrama de radiação varia de acordo com o tipo de antena. Por exemplo, uma antena isotrópica, que é uma abstração teórica, possui um diagrama de radiação esférico, irradiando igualmente em todas as direções. Já antenas direcionais, como as antenas Yagi ou parabólicas, apresentam um diagrama com lóbulos, sendo o lóbulo principal a direção de maior radiação, enquanto os lóbulos secundários e laterais indicam radiação em direções indesejadas ou menos intensas. Minimizar esses lóbulos secundários é um desafio de design, pois eles podem interferir em outros sistemas ou reduzir a eficiência da antena ao dispersar energia para fora da direção desejada.

A importância do diagrama de radiação no projeto de antenas é evidente em sua capacidade de otimizar o direcionamento do sinal. Ao ajustar o formato do padrão de radiação, é possível concentrar a energia em determinadas direções, o que resulta em um aumento da diretividade e, conseqüentemente, do ganho. Isso é particularmente útil em aplicações como radar, telecomunicações e radiodifusão, onde a precisão no direcionamento do sinal é crucial para maximizar a eficiência do sistema.

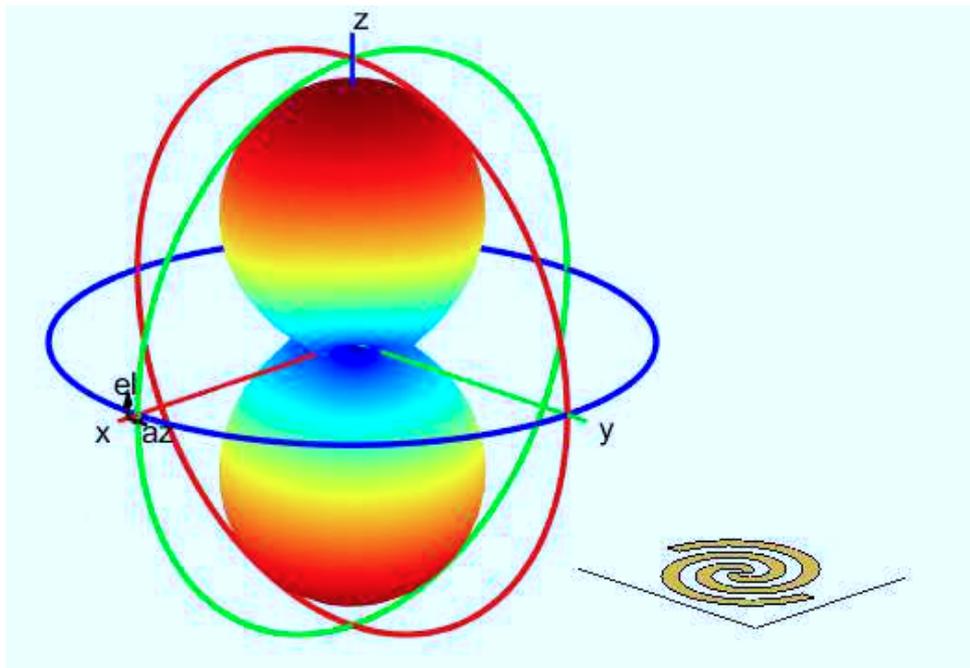
Além disso, o diagrama de radiação também é utilizado para caracterizar a resposta da antena a sinais recebidos, o que é especialmente relevante em sistemas que exigem alta sensibilidade, como antenas de recepção de sinais fracos em grandes distâncias. O padrão de radiação ideal para recepção varia de acordo com a aplicação, sendo necessário ajustar o diagrama para otimizar a captação de sinais provenientes de uma ou várias direções.

Figura 2: Exemplo de um Diagrama de Radiação 2D.



Photonics101, 2024.

Figura 3: Exemplo de um Diagrama de Radiação 3D de uma Antena Espiral.



Mathworks, 2024.

4.3 Superfórmula de Gielis

A Superfórmula de Gielis foi desenvolvida pelo engenheiro e matemático belga Johan Gielis, é uma fórmula geométrica que permite descrever uma grande variedade de formas naturais e figuras complexas usando apenas uma expressão matemática. Essa fórmula é amplamente utilizada para representar formas que aparecem na natureza, como folhas, flores, e até mesmo contornos de certas criaturas. Sua versatilidade advém da combinação de trigonometria com parâmetros ajustáveis, permitindo criar desde círculos até estrelas com vários padrões e simetrias.

Esta fórmula deriva do conceito de superelipses. Enquanto superelipses têm limitações de simetria, a Superfórmula é projetada para superar essas restrições, possibilitando a descrição de formas que variam de círculos e elipses a polígonos complexos.

O cerne da Superfórmula reside em sua capacidade de generalizar a equação do círculo de maneira a se adaptar a diferentes simetrias e proporções, ajustando parâmetros como simetria rotacional e excentricidade. Ao manipular essas variáveis, é possível criar formas que refletem elementos da geometria euclidiana.

A fórmula base é dada em coordenadas polares, onde o raio r em função do ângulo θ é expresso como:

$$r(\theta) = \frac{1}{\left(\left| \frac{\cos(\frac{m\theta}{4})}{a} \right|^{n_2} + \left| \frac{\sin(\frac{m\theta}{4})}{b} \right|^{n_3} \right)^{\frac{1}{n_1}}}. \quad (4.4)$$

Os parâmetros a e b são responsáveis pelo ajuste da escala do eixo horizontal e vertical, respectivamente. Eles definem a largura e a altura da figura. Em muitos casos a e b são iguais para gerar formas "quadradas". O parâmetro m controla a simetria rotacional da forma. Ele define o número de "pétalas" ou repetições ao longo do perímetro da figura. n_1 controla o grau geral de arredondamento ou nitidez da figura, valores baixos tornam a forma mais arredondada, enquanto valores altos a tornam mais angular e definida. n_2 define o arredondamento nas regiões onde o \cos predomina, influenciando as extremidades horizontais da figura. n_3 define o arredondamento nas regiões onde o \sin predomina, influenciando as extremidades verticais da figura.

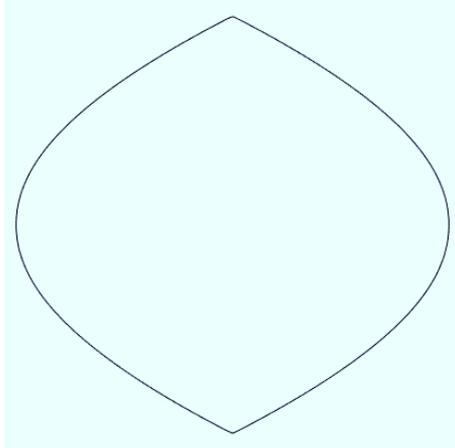
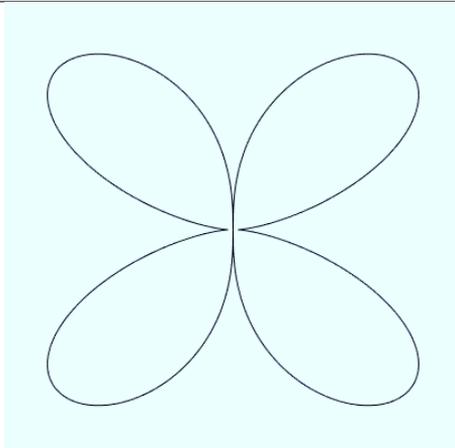
O procedimento metodológico utilizado no projeto de antenas bioinspiradas em plantas está dividido em 11 etapas:

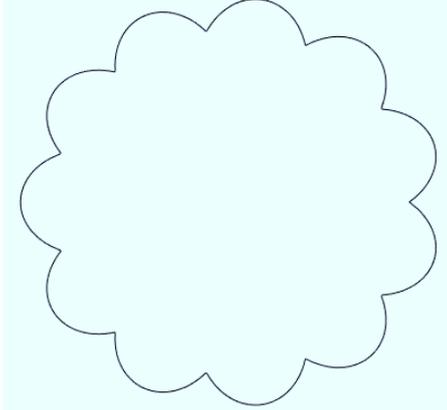
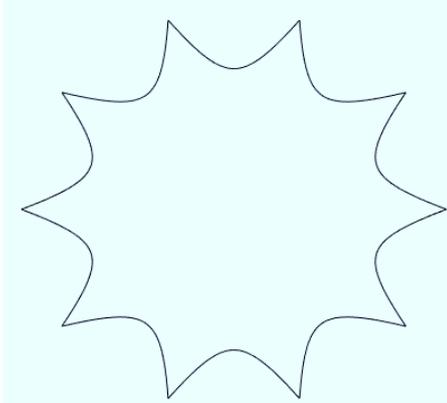
- Escolha da tecnologia em que será utilizada a antena;
- Identificação das frequências de operação;
- Escolha do tipo de antena adequada à aplicação escolhida, com banda larga, banda estreita, polarização circular, cruzada, entre outros;
- Seleção do material condutor e do dielétrico a ser utilizado;
- Caracterização das propriedades dos materiais, utilizando os dados técnicos informados pelos fabricantes ou com uso de algum método de caracterização disponível;
- A partir das informações levantadas, projetar uma antena com geometria euclidiana, geralmente, uma antena com geometria quadrada, retangular ou circular, com o objetivo de obter perímetro total da estrutura;
- Escolha da forma bioinspirada em folhas elípticas que apresentem perímetro total mais próximo da antena com geometria euclidiana;

- Geração da imagem pela expressão de Gielis, com o uso de técnicas de computação assistida por computador (*computer aided designer – CAD*) na geração das imagens da antena em formato DXF (*Drawing Exchange Format*) para importação em um programa de simulação de onda completa;
- Importação da imagem para um programa de simulação de onda completa, nesse trabalho foi usado o Ansys Electromagnetics Suite 2024 R1;
- Simulação e otimização da antena, com ajustes para frequência de ressonância desejada, procedimento semelhante ao realizado em antenas com a geometria euclidiana;
- Construção da antena bioinspirada, que deve levar em consideração o tipo de material utilizado e a tecnologia disponível;

Na tabela a seguir podem ser observadas algumas das formas geradas e o respectivos parâmetros usados.

Tabela 1: Formas Geradas usando a Expressão de Gielis

Formas de Gielis	Parâmetros
	$m = 2;$ $n_1 = 400;$ $n_2 = 1200;$ $n_3 = 1200;$ $a = 1;$ $b = 1;$ $A = 13,9;$ $H = 360.$
	$m = 4;$ $n_1 = -0,1;$ $n_2 = 0,14;$ $n_3 = 1;$ $a = -0,1;$ $b = 1;$ $A = 35;$ $H = 720.$

	$m = 11;$ $n_1 = -2;$ $n_2 = 1;$ $n_3 = 1;$ $a = 1;$ $b = 1;$ $A = 5,32;$ $H = 360.$
	$m = 10;$ $n_1 = 1;$ $n_2 = 4;$ $n_3 = 1;$ $a = 1;$ $b = 1;$ $A = 20;$ $H = 360.$

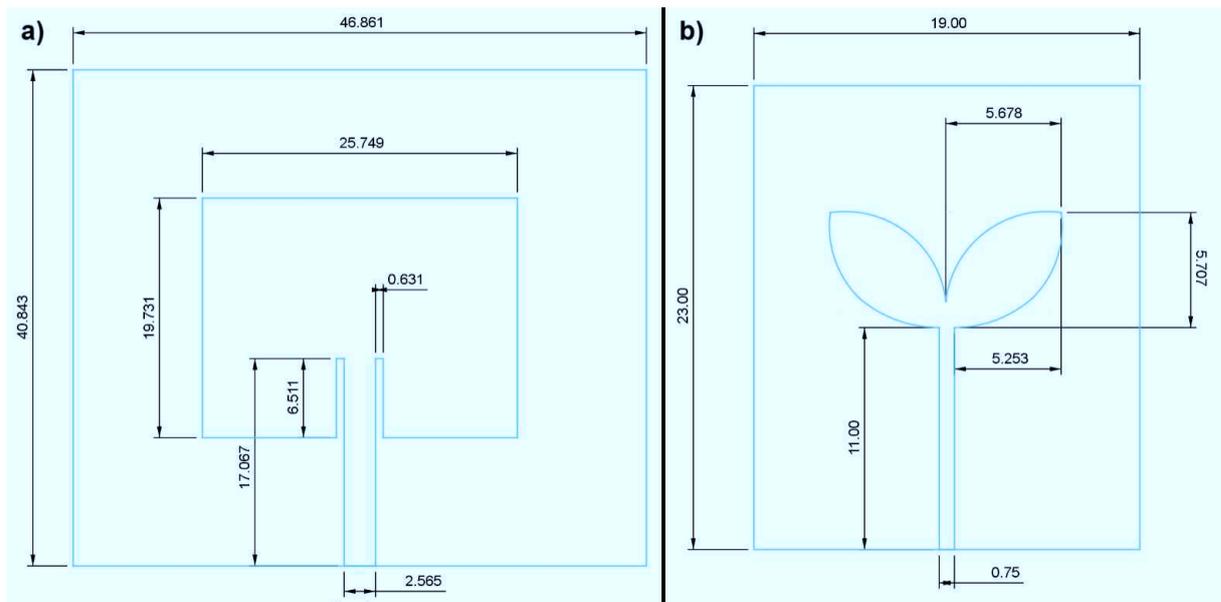
Fonte: Autoria Própria, 2024.

5 RESULTADOS

Os projetos da antena Bioinspirada e da antena Patch podem ser vistos na Figura 4. Os materiais considerados no projeto foram o FR4 como dielétrico, com espessura de $1,6\text{ mm}$ e como condutor o cobre. Para o design da antena Patch foi usada uma ferramenta online (<https://3g-aerial.biz/en/online-calculations/antenna-calculations/patch-antenna-online-calculator>). Com essa ferramenta foram obtidas as dimensões do dielétrico e do elemento irradiante. O "corte" entre a linha de transmissão e a antena é feito para que a impedância característica da linha seja de $50\ \Omega$, que é a impedância dos conectores utilizados.

No design da antena bioinspirada foi usado inicialmente o perímetro da antena patch. Então o projeto foi simulado e de acordo com o resultado as dimensões foram ajustadas até encontrar a frequência de ressonância desejada. O processo foi feito por tentativa e erro.

Figura 4: Dimensões da Antenas Projetadas, a): Patch e b) Bioinspirada.



Autoria Própria, 2024.

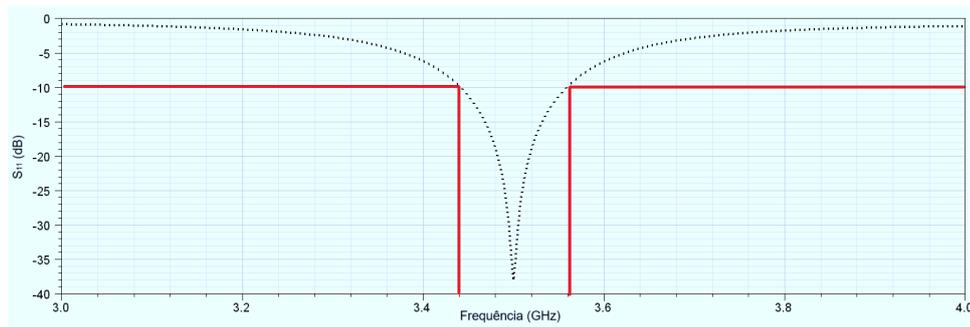
Uma antena é avaliada com base nos seus parâmetros, como o coeficiente de reflexão, S_{11} , que permite observar a largura de banda, a frequência de ressonância e a perda de retorno ideal. Outros parâmetros significativos incluem o ganho, expresso em dBi, que representa o ganho em dB em relação a uma antena isotrópica; a largura de feixe de meia potência, que indica o ângulo de radiação da antena em graus; a densidade de corrente na superfície da estrutura; e a razão axial, que identifica o tipo de polarização da antena.

O parâmetro S_{11} é o coeficiente de reflexão da porta 1, representando o nível de potência recebido pela porta 1 em dB. Conseqüentemente, um valor mais baixo indica mais potência irradiada pela antena e menos potência retornada à porta. Ao avaliar a largura de banda da antena, para esse trabalho foi considerado valores abaixo de -10 dB, indicando que a correspondência de impedância entre a linha de transmissão e o elemento radiador garante que 90% da potência é utilizada pela antena.

A largura de banda, na faixa de frequência abaixo de -10 dB, indica a correspondência de impedância entre a linha de transmissão e o elemento radiador, assegurando mínima potência retornada à fonte e máxima potência irradiada pela antena. Nos resultados, pode-se observar a frequência de ressonância central, que deve apresentar mínima perda de retorno. Uma largura de banda mais ampla permite uma maior quantidade de dados a ser transmitida ou recebida pela antena, e cada tecnologia tem uma largura de banda operacional específica dentro da qual as antenas devem funcionar.

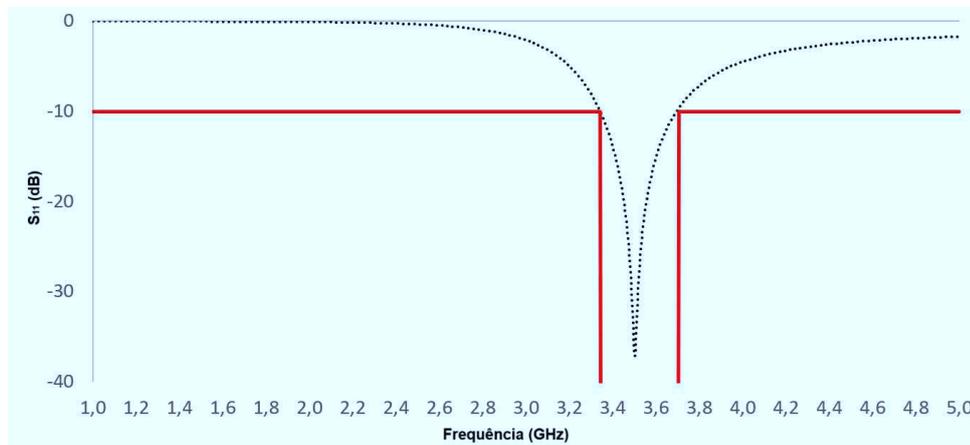
Na simulação a antena Patch ressoou em $3,5 \text{ GHz}$ e apresentou frequência mínima e máxima de operação de $3,44 \text{ GHz}$ e $3,56 \text{ GHz}$, resultando em uma largura de banda de 120 MHz . A antena Bioinspirada também ressoou em $3,5 \text{ GHz}$ e as frequências mínima e máxima foram de $3,33 \text{ GHz}$ e $3,72 \text{ GHz}$, respectivamente, com uma largura de banda de 390 MHz , um aumento de 325% em relação a antena Patch. Os valores absolutos do coeficiente foram de $36,84 \text{ dB}$ e $37,22 \text{ dB}$ para a antena Patch e a Bioinspirada, respectivamente. Na Figura 5 e Figura 6 são apresentados os resultados simulados do S_{11} .

Figura 5: S_{11} da antena Patch.



Autoria Própria, 2024.

Figura 6: S_{11} da antena Bioinspirada.

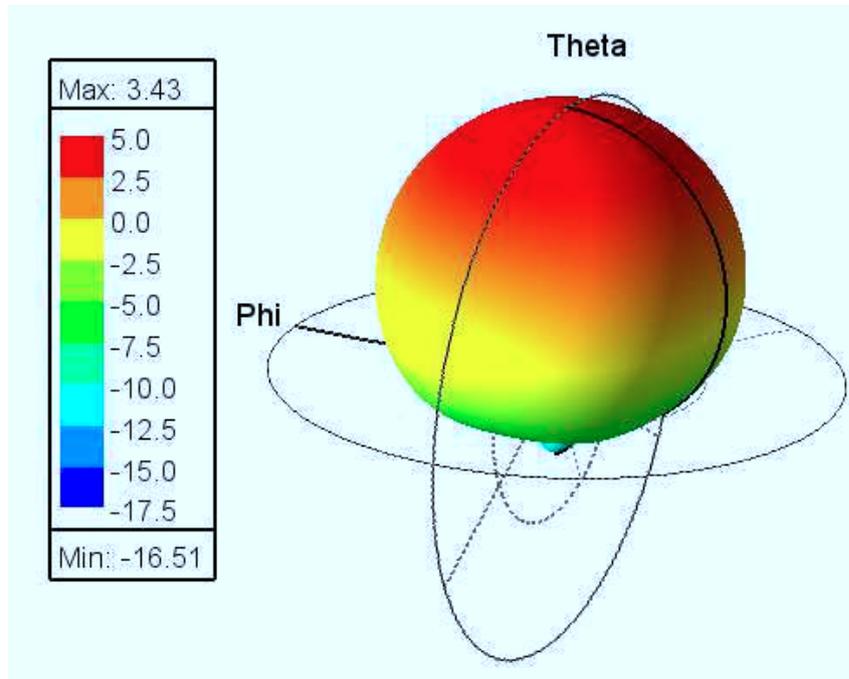


Autoria Própria, 2024.

O diagrama de radiação fornece informações sobre a direção do campo elétrico, no plano E, e do campo magnético, no plano H. A direção de propagação da onda eletromagnética pode ser observada através do plano E. A Figura 5.6 ilustra os resultados simulados, os ganhos foram de $3,43 \text{ dBi}$ para a antena Patch e de $2,02 \text{ dBi}$ para a antena Bioinspirada. O menor ganho da antena projetada se deve principalmente a dois motivos.

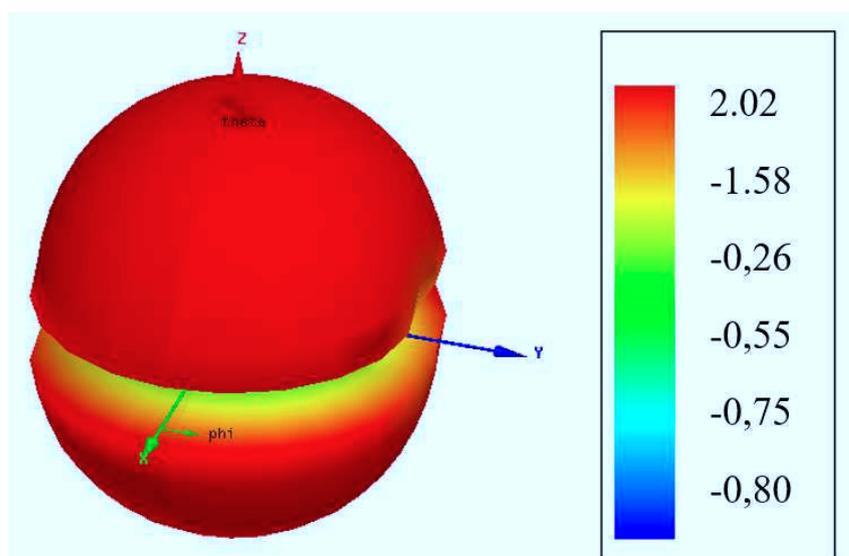
Como a antena bioinspirada é menor, o elemento irradiador tem uma área menor, diminuindo o ganho. Outro motivo é a largura de banda maior da antena proposta, assim a energia é irradiada nas várias frequências de operação da antena, ao contrário da antena Patch que concentra a potência irradiada em um menor número de frequências.

Figura 7: Diagrama de Radiação da antena Patch.



Autoria Própria, 2024.

Figura 8: Diagrama de Radiação da antena Bioinspirada.



Autoria Própria, 2024.

6 CONCLUSÃO

O presente trabalho explorou o desenvolvimento de antenas bioinspiradas, evidenciando a sua relevância no avanço das telecomunicações. O processo metodológico demonstrou como a integração de modelos inspirados na natureza pode não apenas otimizar o desempenho das antenas, mas também permitir a criação de designs mais compactos e esteticamente agradáveis. A escolha dos materiais e a utilização de técnicas avançadas de simulação foram fundamentais para alcançar resultados significativos, especialmente na adaptação das antenas para aplicações em faixa de 5G.

Os resultados observados nas análises de dispositivos projetados, revelaram notáveis melhorias em termos de tamanho, largura de banda e eficiência de radiação em comparação com antenas tradicionais. Esses avanços não só ampliam as possibilidades de aplicação em dispositivos vestíveis e móveis, mas também contribuem para a sustentabilidade e inovação no setor. Adicionalmente, o estudo reforçou a importância da pesquisa contínua em antenas bioinspiradas como um caminho para atender à crescente demanda por soluções eficazes e adaptáveis nas telecomunicações.

REFERÊNCIAS

- ABOLADE, J. O.; KONDITI, D. B.; DHARMADHIKARY, V. M. Bio-inspired wideband antenna for wireless applications based on perturbation technique. *Heliyon*, Elsevier, v. 6, n. 7, 2020.
- ABOLADE, J. O.; KONDITI, D. B.; DHARMADHIKARY, V. M. Compact hexa-band bio-inspired antenna using asymmetric microstrip feeding technique for wireless applications. *Heliyon*, Elsevier, v. 7, n. 2, 2021.
- ARDILA-REY, J. A. et al. Bioinspired ultra high frequency antenna for partial discharge detection in high-voltage equipment. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, IEEE, 2024.
- AZAM, F. et al. Review of recent advancement on nature/bio-inspired antenna designs. *IEEE Access*, IEEE, 2024.
- BALANIS, C. A. *Antenna theory: analysis and design*. [S.l.]: John wiley & sons, 2016.
- BJORGAARD, J. et al. Design and fabrication of antennas using 3d printing. *Progress In Electromagnetics Research C*, EMW Publishing, v. 84, p. 119–134, 2018.
- COLACO, J.; COTTA, J. Study on metamaterial-based bio-inspired microstrip antenna array for 5g enabled mobile health technology. *International Journal of Electronics and Telecommunications*, Polska Akademia Nauk. Czasopisma i Monografie PAN, v. 68, n. 2, 2022.
- DEBAENST, W. et al. Rms delay spread vs. coherence bandwidth from 5g indoor radio channel measurements at 3.5 ghz band. *Sensors*, MDPI, v. 20, n. 3, p. 750, 2020.
- DEJEN, A. et al. *Synthesis of quadband mm-wave microstrip antenna using genetic algorithm for wireless application. Technologies 11 (1): 14*. 2023.
- KONG, B. et al. Bio-inspired porous antenna-like nanocube/nanowire heterostructure as ultra-sensitive cellular interfaces. *NPG Asia Materials*, Nature Publishing Group, v. 6, n. 8, p. e117–e117, 2014.
- LEE, K. F.; CHEN, W. *Advances in microstrip and printed antennas. (No Title)*, 1997.
- LO, B. et al. Bioinspired design for body sensor networks [life sciences]. *IEEE Signal Processing Magazine*, IEEE, v. 30, n. 1, p. 165–170, 2012.
- MASIHI, S. et al. Development of a flexible tunable and compact microstrip antenna via laser assisted patterning of copper film. *IEEE Sensors Journal*, IEEE, v. 20, n. 14, p. 7579–7587, 2020.
- MELCHIORRE, L. et al. Bio-inspired dielectric resonator antenna for wideband sub-6 ghz range. *Applied Sciences*, MDPI, v. 10, n. 24, p. 8826, 2020.
- MIKKI, S.; CLAUZIER, S.; ANTAR, Y. A correlation theory of antenna directivity with applications to superdirective arrays. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, IEEE, v. 18, n. 5, p. 811–815, 2019.

SANTOS, C. H. da S. et al. Bio-inspired algorithms applied to microstrip antennas design. *Journal of Computational Interdisciplinary Sciences*, v. 1, n. 2, p. 141–147, 2009.

SARMA, C. A.; INTHIYAZ, S.; MADHAV, B. Design and assessment of bio-inspired antennas for mobile communication systems. *Int. J. Electr. Electron. Res*, v. 11, p. 176–184, 2023.

XAVIER, G. V. R. et al. Design and application of a metamaterial superstrate on a bio-inspired antenna for partial discharge detection through dielectric windows. *Sensors*, MDPI, v. 19, n. 19, p. 4255, 2019.