

# Caracterização numérica e experimental de uma antena *patch* de microfita com geometria bioinspirada na folha *Monstera deliciosa*

João Victor Alho, Hartur Sousa, Elielson Sales, Rafael Bayma, André Cruz e Andrécia Costa

**Resumo**— Este trabalho apresenta o projeto, a simulação e a validação experimental de uma antena *patch* de microfita com geometria bioinspirada na folha *Monstera deliciosa*. Utilizando modelagem via HFSS e fabricação em substrato FR4, a antena demonstrou comportamento de banda dupla nas frequências 2,57 GHz e 3,09 GHz. A validação experimental foi realizada utilizando um analisador de rede vetorial portátil LiteVNA-64. A impedância de entrada apresentou bom casamento com a linha de  $\sim 50 \Omega$ , com valores próximos ao centro da Carta de Smith.

**Palavras-Chave**— Antena bioinspirada, *Monstera deliciosa*, dupla banda.

**Abstract**— This work presents the design, simulation, and experimental validation of a microstrip patch antenna with a bioinspired geometry based on the *Monstera deliciosa* leaf. Using HFSS modeling via and fabrication on an FR4 substrate, the antenna exhibited dual-band behavior at frequencies of 2.57 GHz and 3.09 GHz. Experimental validation was carried out using a portable vector network analyzer LiteVNA-64. The input impedance showed good matching with the  $\sim 50 \Omega$  line, with values close to the center of the Smith Chart.

**Keywords**— Bioinspired antenna; *Monstera deliciosa*; Dual-band.

## I. INTRODUÇÃO

As antenas *patch* de microfita têm se destacado nas últimas décadas como uma das tecnologias mais promissoras para aplicações em comunicações sem fio, devido à sua estrutura compacta, leveza, baixo custo de fabricação e facilidade de integração com circuitos impressos. Essas antenas consistem, tipicamente, em um substrato dielétrico sobre o qual é depositado um *patch* condutor, podendo assumir diferentes geometrias, como retangular, circular ou elíptica. Devido a essas características, as antenas de microfita são amplamente utilizadas em sistemas de comunicação móvel, redes Wi-Fi, radar e dispositivos de Internet das Coisas (IoT) [1][2].

A bioinspiração tem emergido como uma abordagem inovadora no projeto de antenas, com ênfase em geometrias que mimetizam estruturas naturais, como folhas de plantas. Antenas de microfita bioinspiradas em folhas se beneficiam das formas ramificadas que ocorrem naturalmente, o que pode resultar em melhorias de largura de banda, eficiência de irradiação e resposta multibanda [3].

Todos os autores são da Universidade Federal do Pará, Campus Universitário de Tucuruí, PA. E-mails: joao.alho@tucuruui.ufpa.br, harturdasilvasousa@gmail.com, elielsoncamelo@gmail.com, rafaelbayma@ufpa.br, andcruz@ufpa.br, andreaciocosta@ufpa.br. Este trabalho foi parcialmente financiado pelo Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica - PIBIC, (PRO8175-2024).

Essas estruturas têm se mostrado promissoras em aplicações de dispositivos vestíveis, sensores ambientais e sistemas embarcados para agricultura de precisão, onde o design leve, flexível é essencial [4][5]. Kehn et al. [3] apresentaram uma antena flexível inspirada em folhas para aplicações vestíveis, demonstrando desempenho estável mesmo sob deformações mecânicas. Em outro estudo, Amini et al. [4] realizaram uma análise comparativa de diferentes estruturas biológicas aplicadas ao design de antenas, evidenciando que as formas assimétricas naturais podem melhorar a adaptabilidade do padrão de irradiação. Por sua vez, Paul e Yoon [5] propuseram uma antena inspirada na folha de milho voltada para aplicações em agricultura inteligente, com operação em múltiplas bandas e alta eficiência. Esses trabalhos mostram que a biomimética não apenas contribui esteticamente para os projetos, mas também representa uma estratégia viável para resolver limitações convencionais de antenas planas, especialmente em contextos onde flexibilidade, leveza e integração são essenciais.

Este estudo realiza a análise numérica e experimental de uma antena *patch* de microfita inspirada na folha da *Monstera deliciosa*, conhecida popularmente como costela-de-adão. A estrutura recortada e assimétrica da folha foi escolhida por favorecer o surgimento de múltiplas ressonâncias. Isso amplia a banda passante e a eficiência da antena, além de representar uma alternativa criativa ao uso de geometrias convencionais.

A modelagem numérica foi conduzida utilizando o *software High Frequency Structure Simulator* (HFSS), da ANSYS [6], enquanto as medições experimentais foram realizadas com um Analisador de Rede Vetorial (VNA) portátil, modelo LiteVNA-64. A antena bioinspirada demonstrou comportamento *dual band* nas frequências 2,57 GHz e 3,09 GHz, destacando o potencial da biomimética no *design* de antenas eficientes.

## II. DESIGN E FABRICAÇÃO DA ANTENA PATCH BIOINSPIRADA NA FOLHA MONSTERA DELICIOSA

Os procedimentos iniciais de projeto partiram da análise da folha da *Monstera deliciosa*, conforme ilustrado na figura 1(a).

As dimensões do *patch* da antena bioinspirada foram definidas com base em um projeto de uma antena de microfita com *patch* retangular projetada para operar na frequência de 2,4 GHz, alimentada por linha de microfita com impedância de 50  $\Omega$ , descrita por [7]. Dessa forma, foi realizado uma adaptação e ajustes empíricos para adequar o comportamento da antena projetada ao objetivo desejado (banda dupla). O projeto da antena bioinspirada foi desenvolvido no *software High Frequency*



Fig. 1. Folha *Monstera deliciosa*; (b) Modelo do patch baseado na folha, imagem simétrica espelhada e vetorizada.

*Structure Simulator* (HFSS), da Ansys, utilizando modelagem tridimensional baseada na geometria da folha estudada.

A imagem da folha, previamente convertida para o formato PNG (*Portable Network Graphics*), foi processada, vetorizada e espelhada horizontalmente, com o objetivo de obter uma geometria mais simétrica em relação ao eixo central da folha — eliminando assimetrias naturais características das incisões e perfurações presentes em sua borda. Em seguida, a imagem resultante foi importada para o ambiente do HFSS para compor o contorno *patch* bioinspirado, como é mostrado na figura 1(b). A configuração do substrato considerou o material FR4, com constante dielétrica relativa  $\epsilon_r = 4,4$ , espessura  $h = 1,5$  mm e tangente de perdas  $\tan \delta = 0,02$ .

A figura 2 apresenta a geometria simulada preparada no ambiente de simulação do *software* HFSS.

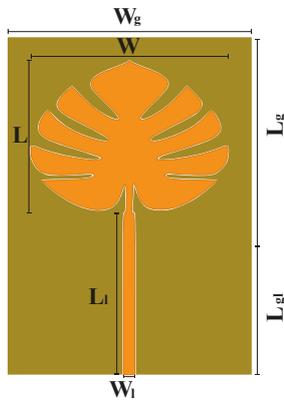


Fig. 2. Projeto da antena *patch* baseada na folha *Monstera deliciosa* com alimentação via linha de microfita.

A Tabela I resume os parâmetros dimensionais da antena projetada.

A fabricação do protótipo foi realizada no Laboratório de Fabricação Digital (FABLAB) do Campus Universitário de Tucuruí (CAMTUC), da Universidade Federal do Pará (UFPA).

O processo teve início com a impressão de um adesivo de recorte gerado por máquina CNC a laser, o qual foi aplicado sobre o substrato FR4. Em seguida, foi realizada a corrosão química com solução de percloroeto de ferro, a fim de remover as áreas de cobre indesejadas e formar o desenho condutor da antena. As etapas do processo de fabricação, assim como o protótipo da antena, estão ilustradas na figura 3.

TABELA I  
PARÂMETROS DIMENSIONAIS DA ANTENA BIOINSPIRADA.

Nome	Parâmetro	(mm)
Largura do <i>patch</i>	$W$	38,046
Comprimento do <i>patch</i>	$L$	29,477
Largura da linha de transmissão	$W_l$	2,384
Comprimento da linha de transmissão	$L_l$	31,250
Largura do <i>Ground</i> 1	$W_g = 6h + W$	47,036
Comprimento do <i>Ground</i> 1	$L_g = 6h + L$	38,477
Comprimento do <i>Ground</i> 2	$L_{gl} = L_l - (L_g - L)/2$	26,750



Fig. 3. Fabricação da antena bioinspirada: (a) Mascara de vinil adesivo após o corte a laser; (b) Processo de corrosão por percloroeto de ferro.

Após a fabricação da antena, foi realizado um procedimento de limpeza com álcool isopropílico, e polimento do *patch* e substrato, finalizando com a soldagem do conector SMA. A figura 4 mostra a visão superior e inferior da antena fabricada.

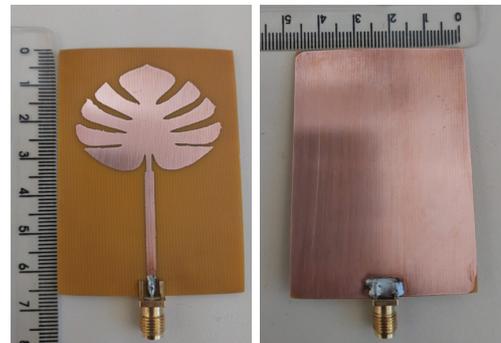


Fig. 4. Antena bioinspirada fabricada: (a) Vista de topo; (b) Vista inferior (plano de terra).

### III. DESEMPENHO DA ANTENA: SIMULAÇÃO E MEDIÇÃO

O procedimento de simulação foi realizado considerando um *solver* com *setup* configura para a faixa de frequência de 2,2 a 3,5 GHz com 1035 pontos. As condições de contorno foram definidas como PEC (*Perfect Electric Conductor*) no *patch*, plano de terra e linha de microfita. A excitação foi realizada utilizando uma alimentação do tipo *Modal Lumped Port* configurada em  $50 \Omega$ . A caracterização experimental da antena foi realizada utilizando um analisador de rede vetorial portátil LiteVNA-64, que opera na faixa de 50 kHz a 6,3 GHz. Os procedimentos de simulação e medição foram realizados

no Laboratório de Eletromagnetismo Aplicado (LEMAG) do CAMTUC. Na figura 5 mostra o *setup* utilizado para a caracterização experimental da antena.

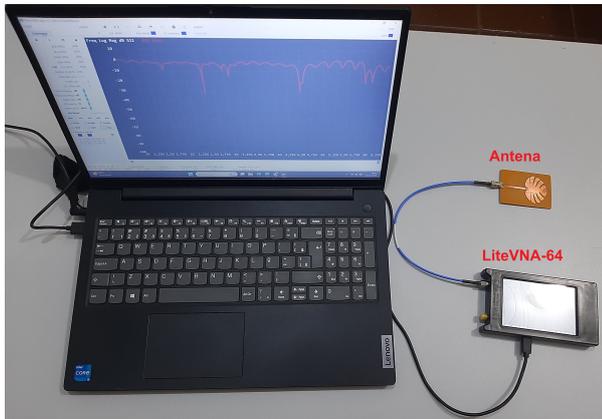


Fig. 5. *Setup* de medição.

O procedimento de medição experimental consiste em três etapas: (i) Calibração do VNA conectado ao notebook, e ajuste dos parâmetros de medição; (ii) Conexão da antena à porta 1 do VNA por meio do cabo coaxial e coleta de dados de  $S_{11}$ , VSWR,  $Z_{ent}$  e carta de Smith; (iii) Exportar os dados .csv e .s1p para posterior análise dos resultados. Os dados medidos foram adquiridos por meio do *software* executável *NanoVNA-App* [8], com visualização em tempo real na tela de um notebook.

Na figura 6 é apresentada a comparação da perda de retorno obtida na simulação no *software* HFSS e a medição realizada utilizando o LiteVNA-64. Os resultados são apresentados na faixa de 2,2 a 3,5 GHz, com destaque para o nível de -10 dB de  $S_{11}$  que define o cálculo da largura de banda.

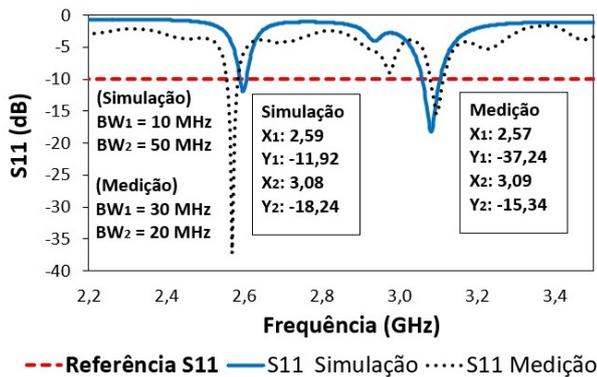


Fig. 6. Comparação entre os resultados simulados e medidos do  $S_{11}$  para a antena proposta.

A primeira frequência de ressonância simulada ocorre em 2,59 GHz, com  $S_{11} = -11,92$  dB e largura de banda (BW) de aproximadamente 10 MHz, valores próximos aos obtidos experimentalmente em 2,57 GHz, com  $S_{11} = -37,24$  dB e BW de 30 MHz. A segunda ressonância simulada aparece em 3,08 GHz ( $S_{11} = -18,24$  dB) com BW de cerca de 50 MHz, enquanto os resultados medidos indicam 3,09 GHz ( $S_{11} = -15,34$  dB) e BW de 20 MHz.

Os valores medidos para a impedância de entrada da antena, traçados sobre a carta de Smith, podem ser visualizados na figura 7.

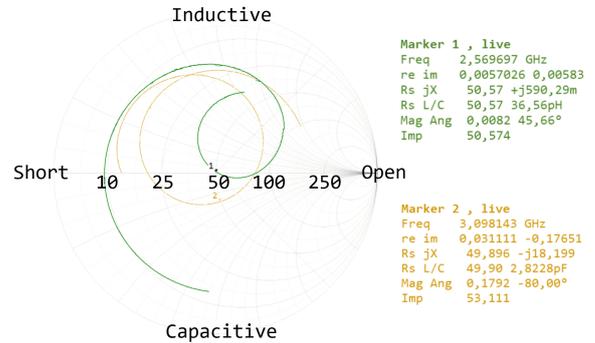


Fig. 7. Carta de Smith para as faixas: 2,4 a 2,6 GHz (em verde), e 3,0 a 3,2 GHz (em laranja).

Na figura 7 o centro da carta indica o casamento de impedâncias em 50  $\Omega$ . A curva em verde indica impedância de entrada de 50,57  $\Omega$  indutiva para  $f = 2,57$  GHz. A curva em laranja indica impedância de entrada de 53,11  $\Omega$  capacitiva para  $f = 3,09$  GHz. Ambas localizadas próximas ao centro da carta evidenciam bom acoplamento de dupla banda.

#### IV. CONCLUSÕES

Este artigo apresentou o desenvolvimento e a validação experimental de uma antena *patch* bioinspirada na folha *Monstera deliciosa*. Os resultados demonstraram operação em dupla banda com boa concordância entre simulação e medição, nas faixas de frequência de 2,59/2,57 GHz e 3,08/3,09 GHz (simulação/medição), com perda de retorno admissível e impedância próxima de 50  $\Omega$ . A análise na Carta de Smith confirmou o bom casamento de impedância, e o uso do VNA portátil, modelo LiteVNA-64 mostrou-se uma alternativa de baixo custo.

Em trabalhos futuros, almeja-se explorar a geometria estudada em substratos flexíveis para aplicações vestíveis, analisar seu desempenho em ambientes reais e estudar a integração com circuitos embarcados e sensores.

#### REFERÊNCIAS

- [1] A. A. Kishk and K. F. Lee, "Recent Advances in Microstrip Antennas," *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 65, no. 1, pp. 12-23, Feb. 2023. doi: 10.1109/MAP.2023.3245187.
- [2] N. Kumar *et al.*, "Compact and Wideband Microstrip Patch Antennas for 5G Applications: A Review," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 7521-7535, 2023. doi: 10.1109/ACCESS.2023.3247534.
- [3] M. N. M. Kehn *et al.*, "Leaf-Inspired Antenna Design for Wearable Applications," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 71, no. 5, pp. 3890-3898, May 2023. doi: 10.1109/TAP.2023.3248910.
- [4] S. H. Amini *et al.*, "Biologically Inspired Antennas: Design and Applications," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 22, no. 7, pp. 1238-1242, Jul. 2023. doi: 10.1109/LAWP.2023.3282041.
- [5] A. R. K. Paul and Y. K. Yoon, "Flexible Leaf-Inspired Antenna for Agricultural IoT Devices," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 10, no. 2, pp. 1231-1240, Jan. 2023. doi: 10.1109/JIOT.2022.3216572.
- [6] ANSYS, "Engineering Simulation & 3D Design Software," Disponível em: <https://www.ansys.com>. Acesso em: mai. 2025.
- [7] L. F. C *et al.*, "Análise numérica de uma antena de microfita com *patch* retangular," in *Anais do 16º Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo - CBMAG*, 2024.
- [8] NanoRFE, "NanoVNA V2 Software," Disponível em: <https://nanorfe.com/nanovna-v2-software.html>. Acesso em: mai. 2025.