



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE TUCURUÍ
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA

HARTUR DA SILVA SOUSA

**ANÁLISE E DESENVOLVIMENTO DE ANTENAS DE MICROFITA COM
TÉCNICAS DE CASAMENTO DE IMPEDÂNCIA E GEOMETRIAS
BIOINSPIRADAS: Compilado de artigos publicados em 2025**

TUCURUÍ

2026

HARTUR DA SILVA SOUSA

**ANÁLISE E DESENVOLVIMENTO DE ANTENAS DE MICROFITA COM
TÉCNICAS DE CASAMENTO DE IMPEDÂNCIA E GEOMETRIAS
BIOINSPIRADAS: Compilado de artigos publicados em 2025**

Trabalho de Conclusão de Curso, apresentado
como requisito parcial para a obtenção de
grau de Bacharel em Engenharia Elétrica,
pela Universidade Federal do Pará.

Orientador:

Dr. André Felipe Souza da Cruz

Coorientadora:

Dr.^a Andrécia Pereira da Costa.

TUCURUÍ

2026

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

D111a da Silva Sousa, Hartur.
ANÁLISE E DESENVOLVIMENTO DE ANTENAS DE
MICROFITA COM TÉCNICAS DE CASAMENTO DE
IMPEDÂNCIA E GEOMETRIAS BIOINSPIRADAS: Compilado
de artigos publicados em 2025 / Hartur da Silva Sousa. — 2026.
19 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. André Felipe Souza da Cruz
Coorientação: Prof^a. Dra. Andrécia Pereira da Costa
Trabalho de Curso (Graduação) - Universidade Federal do Pará,
Campus Universitário de Tucuruí, Faculdade de Engenharia
Elétrica, Tucuruí, 2026.

1. Antenas de microfita; patch circular; técnicas de
alimentação; casamento de impedância; LiteVNA-64.. I.
Título.

Hartur da Silva Sousa

**ANÁLISE E DESENVOLVIMENTO DE ANTENAS DE MICROFITA COM
TÉCNICAS DE CASAMENTO DE IMPEDÂNCIA E GEOMETRIAS
BIOINSPIRADAS: Compilado de artigos publicados em 2025**

Trabalho de Conclusão de Curso, apresentado como requisito parcial para a obtenção de grau de Bacharel em Engenharia Elétrica, pela Universidade Federal do Pará.

Data de aprovação: 15/06/2026

Banca Examinadora:

Prof. Dr. André Felipe Souza da Cruz
Orientador - FEE/CAMTUC/UFPA

Prof^ª. Dr^a. Andrécia Pereira da Costa
Coorientadora - FEE/CAMTUC/UFPA

Prof. Dr. Janilson Leão de Souza
Avaliador Externo - IFPA

TUCURUÍ

2026



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE TUCURUI
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA

TÍTULO: ANÁLISE E DESENVOLVIMENTO DE ANTENAS DE MICROFITAS COM TÉCNICAS DE CASAMENTO DE IMPEDÂNCIA E GEOMETRIAS BIOINSPIRADAS: Compilado de artigos publicados em 2025

DISCENTE: Hartur da Silva Sousa

MATRÍCULA: 202233940019

#	BANCA EXAMINADORA	CONDIÇÃO
1	Prof. Dr. André Felipe Souza da Cruz – FEE/UFPA	Orientador
2	Prof.ª Dr.ª Andrécia Pereira da Costa – FEE/UFPA	Coorientadora
3	Prof. Dr. Janilson Leão de Souza – IFPA	Membro externo

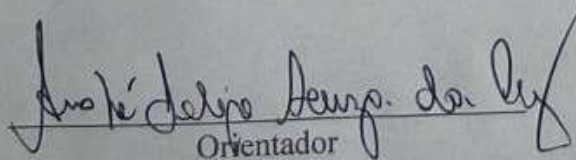
Data da Defesa: 15/06/2026 **Hora Início:** 15:00 **Hora Término:** 16:25

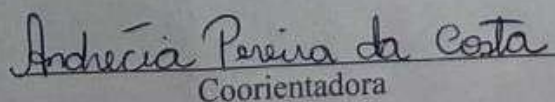
Trabalho Escrito (0 a 10 pontos por critério)	Examinador 1	Examinador 2	Examinador 3
Formatação	9,00	9,80	10
Linguagem (gramática e semântica)	9,00	9,80	10
Conteúdo técnico	9,75	10,00	9,8

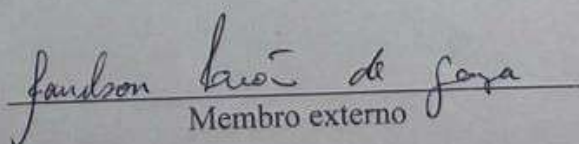
Defesa Oral (0 a 10 pontos por critério)	Examinador 1	Examinador 2	Examinador 3
Sequência lógica de apresentação	10,00	10,00	10
Administração do tempo	9,00	10,00	10
Expressão oral	9,50	10,00	10
Domínio do tema	9,50	10,00	10

Média por examinador	9,39	9,94	9,97
Média Final	9,77		
Conceito Final	EXCELENTE		

Tucuruí-Pa, 15 de junho de 2026.


Orientador


Coorientadora


Membro externo

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por me conceder força, sabedoria e perseverança para superar os desafios encontrados ao longo desta trajetória acadêmica.

À minha família, pelo apoio incondicional, incentivo e compreensão em todos os momentos, especialmente durante os períodos mais difíceis desta caminhada.

Ao meu orientador, André Felipe Souza da Cruz, pela dedicação, paciência, orientação e pelos valiosos ensinamentos compartilhados durante o desenvolvimento deste trabalho. Sua contribuição foi fundamental para a realização deste TCC.

À minha coorientadora, Andrécia Pereira da Costa, pelo apoio, disponibilidade e pelas valiosas contribuições fornecidas ao longo do desenvolvimento deste trabalho, enriquecendo significativamente esta pesquisa.

Ao professor Janilson Leão de Souza, membro externo da banca examinadora, pela disponibilidade em participar da avaliação deste trabalho e pelas contribuições e sugestões que colaboraram para o aprimoramento desta pesquisa.

Ao corpo docente da Faculdade de Engenharia Elétrica, pelos conhecimentos transmitidos, pela dedicação ao ensino e pela contribuição essencial para minha formação acadêmica e profissional.

Aos meus amigos, que estiveram presentes ao longo dessa jornada, oferecendo apoio, motivação e tornando essa caminhada mais leve e significativa.

A todos os colegas e pessoas que contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho, meus sinceros agradecimentos.

Por fim, agradeço a todos que fizeram parte dessa etapa importante da minha vida e contribuíram para a concretização deste trabalho.

RESUMO

Neste trabalho, é apresentado um compilado de artigos científicos que abordam o projeto, a simulação, a fabricação e a caracterização experimental de antenas de microfita, com ênfase na comparação do desempenho de diferentes técnicas de casamento de impedância aplicadas a *patches* circulares e na investigação de geometrias não convencionais. Inicialmente, é realizada uma análise comparativa de antenas de microfita com *patch* circular projetadas para operar na frequência de 2,4 GHz, considerando técnicas de alimentação por sonda coaxial, linha de microfita indentada e transformador de quarto de onda. As análises foram conduzidas por meio de simulações numéricas no *software* Ansys HFSS, avaliando parâmetros como perda de retorno, razão de onda estacionária (VSWR), impedância de entrada e largura de banda. Os resultados indicaram diferenças significativas entre as técnicas analisadas, sendo observado melhor desempenho para a alimentação por linha de microfita indentada, que apresentou perda de retorno inferior a -20 dB na frequência de projeto e valores de VSWR próximos de 1,2, enquanto as demais técnicas apresentaram maior sensibilidade a variações geométricas e deslocamentos da frequência de ressonância. Em seguida, é apresentado o projeto e a validação experimental de uma antena *patch* de microfita com geometria bioinspirada na folha *Monstera deliciosa*, desenvolvida sobre substrato dielétrico FR-4, cujos resultados demonstraram comportamento de banda dupla, com frequências de ressonância em aproximadamente 2,57 GHz e 3,09 GHz, além de bom casamento de impedância com a linha de alimentação de aproximadamente $50\ \Omega$. A fabricação das antenas foi realizada por meio de corte a laser e corrosão química, utilizando técnicas compatíveis com a realidade de laboratórios acadêmicos. A caracterização experimental foi conduzida com o analisador vetorial de redes portátil LiteVNA-64, permitindo a comparação direta entre os resultados simulados e medidos. Os resultados obtidos demonstram a viabilidade das metodologias adotadas tanto para a análise de técnicas de casamento de impedância em *patches* circulares quanto para o desenvolvimento de antenas de microfita com geometrias bioinspiradas, evidenciando o potencial de aplicação dessas abordagens em projetos acadêmicos e de pesquisa.

Palavras-chave: Antenas de microfita; *patch* circular; técnicas de alimentação; casamento de impedância; LiteVNA-64.

ABSTRACT

This work presents a compilation of scientific articles addressing the design, simulation, fabrication, and experimental characterization of microstrip antennas, with emphasis on the performance comparison of different impedance matching techniques applied to circular patch antennas and the investigation of nonconventional geometries. Initially, a comparative analysis of circular patch microstrip antennas designed to operate at 2.4 GHz is carried out, considering feeding techniques such as coaxial probe, inset microstrip line, and quarter-wave transformer. The analyses are performed through numerical simulations using the Ansys HFSS software, evaluating parameters such as return loss, voltage standing wave ratio (VSWR), input impedance, and bandwidth. The results indicate significant differences among the analyzed techniques, with the inset microstrip line feed presenting the best performance, achieving return loss below -20 dB at the design frequency and VSWR values close to 1.2, while the other techniques showed higher sensitivity to geometric variations and resonance frequency shifts. Subsequently, the design and experimental validation of a microstrip patch antenna with a bioinspired geometry based on the *Monstera deliciosa* leaf are presented. The antenna was developed on an FR-4 substrate and exhibited dual-band behavior, with resonance frequencies around 2.57 GHz and 3.09 GHz, as well as good impedance matching to a $50\ \Omega$ feed line. The antennas were fabricated using laser cutting and chemical etching processes, and the experimental characterization was performed using the portable vector network analyzer LiteVNA-64, allowing direct comparison between simulated and measured results. The obtained results demonstrate the feasibility of the proposed methodologies for both impedance matching analysis and the development of bioinspired microstrip antennas, highlighting their applicability in academic and research-oriented projects.

Keywords: Microstrip antennas; circular patch; feeding techniques; impedance matching; LiteVNA-64.

SUMÁRIO

1	TEXTO INTEGRADOR	9
	ANEXO A – ANÁLISE NUMÉRICA DE UMA ANTENA DE MICROFITA COM <i>PATCH</i> CIRCULAR . . .	11
	ANEXO B – CARACTERIZAÇÃO NUMÉRICA E EXPE- RIMENTAL DE UMA ANTENA <i>PATCH</i> DE MICROFITA COM GEOMETRIA BIOINSPI- RADA NA FOLHA <i>MONSTERA DELICIOSA</i>	15

1 TEXTO INTEGRADOR

Atualmente, as tecnologias baseadas em micro-ondas e radiofrequência desempenham um papel essencial no desenvolvimento de sistemas modernos de comunicação. Aplicações como telefonia móvel, redes Wi-Fi e 5G, sensores automotivos baseados em ondas milimétricas, sistemas de comunicação por satélite, radiodifusão e Dispositivos de Identificação por Radiofrequência (RFID) evidenciam a ampla disseminação dessas tecnologias no cotidiano. Diante desse cenário, torna-se cada vez mais relevante a formação de engenheiros capazes de compreender os princípios eletromagnéticos envolvidos e aplicá-los de forma eficiente no projeto de dispositivos de radiofrequência.

Entre os diversos dispositivos utilizados em sistemas de comunicação sem fio, as antenas de microfitas destacam-se por apresentarem baixo perfil, custo reduzido de fabricação e facilidade de integração com circuitos impressos. Desde que passaram a ser estudadas de forma sistemática a partir da década de 1970, inicialmente motivadas por aplicações aeroespaciais, essas antenas evoluíram significativamente e consolidaram-se como uma solução amplamente empregada em sistemas de comunicação modernos, apesar de limitações inerentes, como largura de banda relativamente estreita.

Do ponto de vista construtivo, uma antena de microfita é composta essencialmente por um elemento condutor, denominado *patch*, disposto sobre um substrato dielétrico e apoiado por um plano de terra. A geometria do *patch*, as propriedades do substrato e, principalmente, a técnica de alimentação adotada exercem influência direta sobre o desempenho da antena, afetando parâmetros como frequência de ressonância, impedância de entrada, perda de retorno, razão de onda estacionária (VSWR), largura de banda e padrão de radiação.

Nesse contexto, ao longo da graduação, o autor deste trabalho desenvolveu pesquisas no Laboratório de Eletromagnetismo Aplicado (LEMAG) do Campus Universitário de Tucuruí da Universidade Federal do Pará (CAMTUC–UFPA), com foco na análise do desempenho de diferentes técnicas de casamento de impedância aplicadas a antenas de microfita. As investigações concentraram-se em antenas projetadas para operar na frequência de 2,4 GHz, amplamente utilizada em aplicações de comunicação *wireless indoor* e Wi-Fi. Foram estudadas técnicas distintas de alimentação, incluindo sonda coaxial, linha de microfita indentada e transformador de quarto de onda, com o objetivo de comparar seus efeitos sobre o comportamento eletromagnético das antenas.

A metodologia adotada baseou-se inicialmente em simulações numéricas realizadas no *software Ansys HFSS (High-Frequency Structure Simulator)*, permitindo uma avaliação sistemática da influência de cada técnica de casamento de impedância sobre parâmetros de

desempenho fundamentais, tais como frequência de ressonância, perda de retorno, VSWR, impedância de entrada e largura de banda. A partir dos resultados obtidos em ambiente de simulação, foi possível estabelecer critérios técnicos para a seleção e otimização das técnicas de alimentação, servindo de base para as etapas subsequentes do trabalho.

Na sequência, foram realizadas as etapas de fabricação dos protótipos das antenas estudadas, utilizando processos compatíveis com a realidade de laboratórios acadêmicos. A confecção das antenas foi realizada por meio de corte a laser de máscaras seguido de corrosão química com percloreto de ferro, técnica que possibilita boa precisão geométrica e baixo custo de implementação. Após a fabricação, os protótipos foram caracterizados experimentalmente com o analisador vetorial de redes portátil LiteVNA-64, permitindo a comparação direta entre os resultados simulados e medidos.

Os resultados obtidos ao longo dessas pesquisas foram consolidados em dois artigos científicos publicados no XLIII Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais (SBrT), em 2025. O primeiro artigo teve como foco a avaliação comparativa do desempenho de diferentes técnicas de casamento de impedância aplicadas a antenas de microfitas projetadas para operar na frequência de 2,4 GHz. Nesse estudo, foram analisadas técnicas distintas de alimentação por meio de simulações no *Ansys* HFSS e posterior validação experimental, avaliando parâmetros como perda de retorno, VSWR, impedância de entrada e largura de banda.

O segundo artigo apresentou o projeto, a simulação e a validação experimental de uma antena *patch* de microfita com geometria bioinspirada na folha *Monstera deliciosa*. A antena foi modelada no *Ansys* HFSS e fabricada em substrato FR-4, utilizando corte a laser e corrosão química. Os resultados numéricos e experimentais demonstraram comportamento de banda dupla, com frequências de ressonância em aproximadamente 2,57 GHz e 3,09 GHz. A validação experimental foi realizada com o analisador de redes vetorial portátil LiteVNA-64, sendo observado bom casamento de impedância com a linha de aproximadamente 50 Ω , com valores próximos ao centro da Carta de Smith.

Dessa forma, os dois trabalhos apresentam caráter complementar. Enquanto o primeiro estabelece uma base sólida para a compreensão e comparação de técnicas de casamento de impedância em antenas de microfita, o segundo explora uma geometria não convencional, demonstrando que o uso de formas bioinspiradas pode resultar em múltiplas ressonâncias e desempenho eletromagnético adequado. Em conjunto, os resultados confirmam a viabilidade das metodologias adotadas e contribuem para o fortalecimento da pesquisa em eletromagnetismo aplicado no âmbito do CAMTUC–UFPA.

Este texto integrador foi desenvolvido com base nos fundamentos teóricos apresentados por Balanis na área de antenas e propagação eletromagnética, bem como nos resultados e discussões dos artigos científicos que compõem este Trabalho de Conclusão de Curso, estabelecendo uma conexão entre a teoria e as atividades de pesquisa realizadas.

ANEXO A – ANÁLISE NUMÉRICA DE UMA ANTENA DE MICROFITA COM *PATCH* CIRCULAR

Na próxima página encontra-se o arquivo original do artigo intitulado Avaliação experimental de técnicas de casamento de impedância em antenas de microfita *patch* circular, apresentado no XLIII Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamentos de Sinais – SBrT, realizado em Natal-RN, no ano de 2025.

Avaliação experimental de técnicas de casamento de impedância em antenas de microfita *patch* circular

Hartur Sousa, Jéssica Sousa, Rafael Bayma, Andrécia Costa e André Cruz

Resumo— Este trabalho apresenta uma avaliação experimental dos parâmetros de desempenho de três antenas de microfita com *patch* circular, cada uma utilizando uma técnica distinta de casamento de impedância. As antenas foram projetadas para operar na frequência de 2,4 GHz, com alimentação de 50 Ω . As técnicas de casamento de impedância empregadas foram: sonda coaxial, linha de microfita indentada e transformador de 1/4 de onda. A otimização do casamento de impedância foi realizada utilizando o software Ansys HFSS. Os resultados foram validados por meio da caracterização experimental das antenas, utilizando o analisador vetorial de rede portátil LiteVNA-64.

Palavras-Chave— Antena de microfita, casamento de impedância, caracterização experimental.

Abstract— This work presents an experimental evaluation of the performance parameters of three microstrip antennas with circular patch, each employing a distinct impedance matching technique. The antennas were designed to operate at a frequency of 2.4 GHz, with a 50 Ω feed. The impedance matching techniques used were: coaxial probe, inset-fed microstrip line, and quarter-wave transformer. The impedance matching was optimized using Ansys HFSS software. The results were validated through experimental characterization of the antennas using the LiteVNA-64 portable vector network analyzer.

Keywords— Microstrip antenna, impedance matching, experimental characterization.

I. INTRODUÇÃO

Antenas de microfita têm sido amplamente utilizadas em aplicações de comunicação sem fio devido às suas características favoráveis, como baixo perfil, baixo custo de fabricação e fácil integração com circuitos de radiofrequência [1]. Entre as diversas geometrias disponíveis, a antena de *patch* circular destaca-se por sua simetria, estabilidade na resposta de frequência e estado da arte bem consolidado [2].

O desempenho das antenas de microfita é influenciado tanto por sua geometria e material dielétrico quanto pela técnica de alimentação, a qual afeta diretamente parâmetros como largura de banda, frequência de operação, taxa de onda estacionária e perda de retorno [3]. A escolha da técnica de alimentação ideal requer avaliar fatores como facilidade de fabricação, adaptação à impedância de 50 ohms, estabilidade da frequência e complexidade do projeto, sendo que simulações com ferramentas como o *High Frequency Structure Simulator* fornecido pela Ansys são essenciais para otimizar o desempenho da antena [4] [5].

Hartur Sousa¹, e-mail: hartur.sousa@tucurui.ufpa.br; Jéssica Sousa¹, e-mail: jessica.sousa@tucurui.ufpa.br; Rafael Bayma², e-mail: rafael-bayma@ufpa.br; Andrécia Costa², e-mail: andreciacosta@ufpa.br; André Cruz², e-mail: andcruz@ufpa.br. ¹Curso de Engenharia Elétrica, ²Faculdade de Engenharia Elétrica; ^{1,2} Universidade Federal do Pará. Este trabalho foi parcialmente financiado por FAPESPA (projeto PRO6432-2023).

Este trabalho apresenta uma análise comparativa de desempenho de três antenas de microfita com *patch* circular projetadas para 2,4 GHz, cada uma utilizando uma técnica distinta de casamento de impedância: sonda coaxial, linha de microfita indentada e transformador de 1/4 de onda. Realizando uma varredura paramétrica de cada técnica no software HFSS, e por meio da fabricação utilizando corte a laser e corrosão, as antenas foram caracterizadas utilizando um analisador de rede vetorial portátil LiteVNA-64 [3]. Ao comparar os resultados simulados e experimentais, verificou-se um desvio médio de 0,11 GHz na resposta em frequência. A técnica de transformador de 1/4 de onda mostrou maior largura de banda relativa de 2,24%.

II. PROJETO DA ANTENA PATCH CIRCULAR

Para determinar o raio do *patch* circular das antenas de microfita, utilizou-se a equação (1) [1].

$$a = F \left\{ 1 + \left[\frac{2h}{\pi \epsilon_r F} \right] \left(\ln \left[\frac{\pi F}{2h} \right] + 1,7726 \right) \right\}^{-1/2}, \quad (1)$$

onde $F = 8,791 \times 10^9 / (f_r \sqrt{\epsilon_r})$, a frequência f_r em Hz, e a espessura h do substrato em cm.

As antenas foram projetadas para em $f_r = 2,4$ GHz, amplamente utilizada em aplicações de comunicação sem fio como *Wi-Fi* (IEEE 802.11), *Bluetooth* (IEEE 802.15.1) e *ZigBee* (IEEE 802.15.4) [6]. O raio do *patch* é determinado considerando que a antena possui um substrato de fibra de vidro FR4 com espessura $h = 0,15$ cm, com constante dielétrica $\epsilon_r = 4,4$ e tangente de perdas 0,02, resultando em um *patch* com raio $a \approx 1,6976$ cm. A largura e o comprimento do substrato quadrado (com plano de terra) foram determinados por $L_g = W_g = 6h + 2a \approx 4,2951$ cm [5].

Na figura 1 são mostradas as três antenas utilizando alimentação por: sonda coaxial abaixo do plano de terra, linha de microfita indentada e transformador de 1/4 onda.

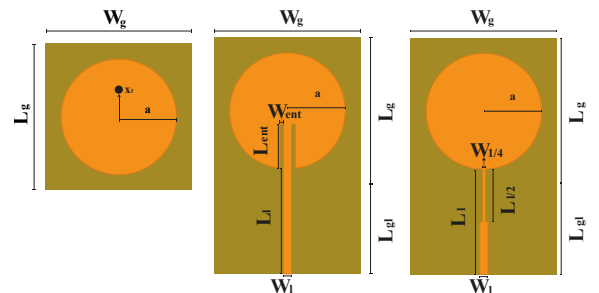


Fig. 1. Antenas *patch* circular com: (a) Sonda coaxial abaixo do plano de terra; (b) Linha de microfita indentada; (c) Transformador de 1/4 onda.

Para determinar a largura W_l das linhas de microfita com impedância Z_l foi utilizada a equação (2) definida por [3].

$$Z_l = \begin{cases} \frac{60}{\sqrt{\epsilon_{ref}}} \ln \left[\frac{8h}{W_l} + \frac{W_l}{4h} \right], & W_l \leq h \\ \frac{120\pi}{\sqrt{\epsilon_{ref}}} \left(\frac{W_l}{h} + 1,393 + 0,667 \ln \left[\frac{W_l}{h} + 1,444 \right] \right)^{-1}, & W_l > h \end{cases} \quad (2)$$

onde ϵ_{ref} é permissividade relativa efetiva entre o dielétrico e espaço livre, aproximada pela equação (3) definida por [3].

$$\epsilon_{ref} = \frac{(\epsilon_r + 1)}{2} + \frac{(\epsilon_r - 1)}{2} \left[1 + 12 \frac{h}{2a} \right]^{-1/2} \quad (3)$$

A partir da inversão da equação (2) para $Z_l = 50 \Omega$, verificou-se uma largura de $W_l = 0,24$ cm. O comprimento total das linhas de microfita pode ser determinado por $L_l = \lambda_g/2 \approx 3,09$ cm, com $\lambda_g = c/(f_r \sqrt{\epsilon_{ref}})$.

III. RESULTADOS

A posição x_f da sonda coaxial na antena 1, as dimensões W_{ent} e L_{ent} dos entalhes da antena 2, e a largura $W_{1/4}$ do trecho de $1/4$ de λ_g da antena 3 podem ser determinados a partir de um conjunto de simulações paramétricas no *software* Ansys HFSS, em conjunto com um código no *software* Matlab para os parâmetros de desempenho: Perda de retorno (S_{11} , dB), Largura de banda relativa (BW, %) e menor desvio de f_r .

O setup de simulação empregou 20 iterações adaptativas com malha $\lambda/3$ (0,3333) e tolerância $\Delta S \leq 0,002$, analisando a faixa de 2 a 3 GHz (1500 pontos de frequência). Para a Antena 1, implementou-se um cabo coaxial (diâmetro externo de 0,4 cm e diâmetro do condutor interno 0,14 cm, $\epsilon_r = 2,25$) com *Wave Port*, enquanto as Antenas 2 e 3 utilizaram *Lumped Ports* (50 Ω). Condições de contorno PEC foram aplicadas ao patch e ao plano de terra. A validação experimental foi realizada utilizando o LiteVNA-64 portátil, calibrado com a técnica *Short, Open, Load* (SOL).

Na figura 2 são mostrados os resultados de desempenho da antena 1 (com sonda coaxial) variando a posição de alimentação x_f de 0 a 0,5a em 25 pontos.

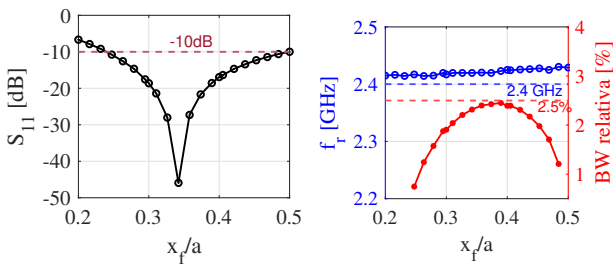


Fig. 2. Desempenho da antena 1 em função da posição de alimentação em x_f , normalizado pelo raio a do patch: (a) Perda de retorno; (b) Frequência de ressonância (em azul) e Largura de banda relativa (em vermelho).

A partir da figura 2(a) foi verificado que a antena apresentou menor perda de retorno com a sonda em $x_f = 0,3421a$. No entanto, avaliando a figura 2(b), verifica-se que a maior largura de banda relativa é obtida para $x_f = 0,3737a$, de BW = 2,4262%, com perda de retorno admissível de -21,67 dB e frequência de ressonância de 2,4196 GHz (desvio de 0,81%).

Na figura 3 são mostrados os resultados de desempenho para a antena 2 alimentada por linha de microfita indentada (*inset-fed*) com dois entalhes no *patch* circular. Foram realizadas 375 simulações variando a largura W_{ent} dos entalhes de 0 a 0,24 cm, e o comprimento L_{ent} de 0,6 a 1,69 cm.

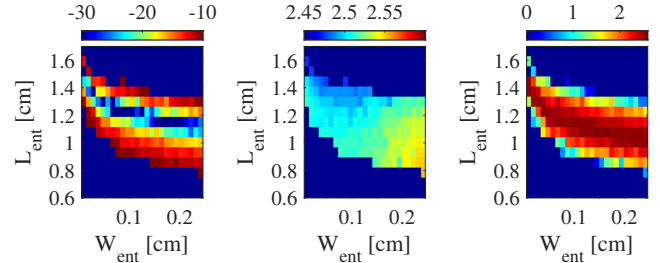


Fig. 3. Desempenho da antena 2 em função da largura W_{ent} e comprimento L_{ent} dos entalhes: (a) Perda de retorno; (b) Frequência de ressonância; (c) Largura de banda relativa.

A partir da figura 3 a verifica-se que a antena 2 apresenta perda de retorno mínima para um entalhe mais comprido e e mais estreito, quase atingindo o centro do *patch* circular. No entanto, fabricar um entalhe estreito com precisão pode ser um desafio. Ao aumentar a largura do entalhe, verifica-se que a antena passa a ressoar com valores menores de comprimento do entalhe. Isso mostra que, diferente da antena *patch* retangular, a largura e o comprimento ideal do entalhe não são independentes.

A partir da figura 3(b) verifica-se que a frequência de ressonância da antena é deslocada para a direita a medida que a largura do entalhe aumenta. Tal deslocamento é resultado da diminuição da área efetiva do *patch* da antena. A decisão para escolha da largura e do comprimento do entalhe na antena 2 foi tomada a partir da análise dos resultados da figura 3(c), ao avaliar os pontos de maior largura de banda relativa, na faixa entre 2,4 a 2,5%. A partir dessa primeira seleção, decidiu-se por avaliar os resultados com menor deslocamento da frequência de 2,4 GHz, com perda de retorno entre -20 e -30 dB, com maior largura de entalhe, para facilitar a fabricação da antena.

Os resultados mostraram-se adequados para $W_{ent} = 0,03887$ cm (ou 0,39mm) e $L_{ent} = 1,3007$ cm, com a antena 2 apresentando a seguinte resposta: BW = 2,5114%, $S_{11} = -25,10$ dB, e $f_r = 2,5114$ GHz (desvio de 4,04%).

Para a antena 3, foi variada a largura $W_{(1/4)}$ do trecho de $L_{l/2} = \lambda_g/4$ de 0 a 0,5 W_l em 30 pontos (figura 3).

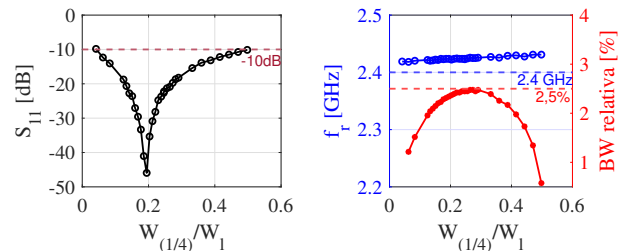


Fig. 4. Desempenho da antena 3 em função da largura $W_{(1/4)}$, normalizado pela largura da linha W_l : (a) Perda de retorno; (b) Frequência de ressonância (em azul) e Largura de banda relativa (em vermelho).

Buscando resultados mais precisos, as simulações para a antena 3 foram realizadas em passos não uniformes de $W_{1/4}$, com maior concentração de pontos entre 0,1 e $0,3W_l$, como é indicado na figura 4. Verifica-se que a menor perda de retorno é apresentada para $W_{1/4} = 0,2W_l$. Contudo, avaliando a figura 4b, constata-se que a maior largura de banda é obtida para $W_{1/4} = 0,2468W_l$ ($W_{1/4} \approx W_l/4$).

Os resultados mostraram-se adequados para a antena 3 com alimentação via linha de microfita com transformador de quarto de onda com comprimento $L_l/2 = \lambda_g/4 = 1,54\text{cm}$ e largura $W_{1/4} = 0,059\text{ cm}$ (ou $0,59\text{mm}$), apresentando a seguinte resposta: $BW = 2,4504\%$, $S_{11} = -22,20\text{ dB}$, e $f_r = 2,4329\text{ GHz}$ (desvio de $1,37\%$).

A partir da escolha da posição x_f da sonda coaxial de alimentação na antena 1, as dimensões W_{ent} e L_{ent} dos entalhes na antena 2, e a largura $W_{1/4}$ na linha da antena 3, foi iniciado o processo de fabricação das três antenas pelo método de corrosão com percloreto de ferro.

Os desenhos foram transferidos para o FR4 com vinil adesivo, cortado com um *router* CNC a laser com precisão de $0,01\text{ cm}$, usando um laser de CO_2 com potência de 80 W . No processo, foi utilizado 8% da capacidade para um corte superficial do vinil adesivo. A solução corrosiva foi diluída na proporção de uma parte de percloreto para quatro partes de água. Após a corrosão, a placa foi lavada, os adesivos de vinil remanescentes foram removidos, e em cada caso foi solado um conector SMA. As antenas fabricadas são mostradas na figura 5.

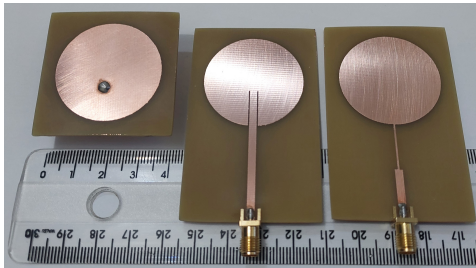


Fig. 5. Antenas 1, 2 e 3 fabricadas pelo método de corte a laser e corrosão por percloreto de ferro, cada com o devido conector SMA soldado com estanho.

Na figura 6 é mostrado o *setup* de medição das antenas utilizando o LiteVNA-64.

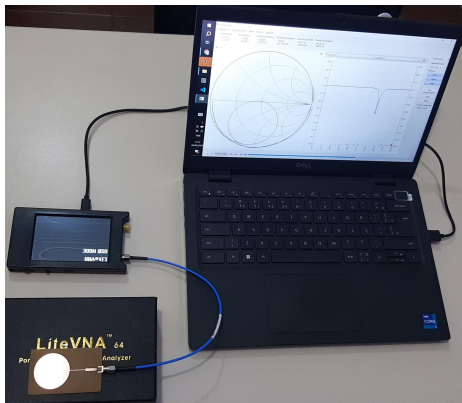


Fig. 6. Setup de medição utilizando LiteVNA-64 portátil e notebook.

Os resultados de S_{11} para as antenas 1, 2 e 3 no *software* HFSS, juntamente com os dados de medição obtidos utilizando o LiteVNA-64 são mostrados na figura 7.

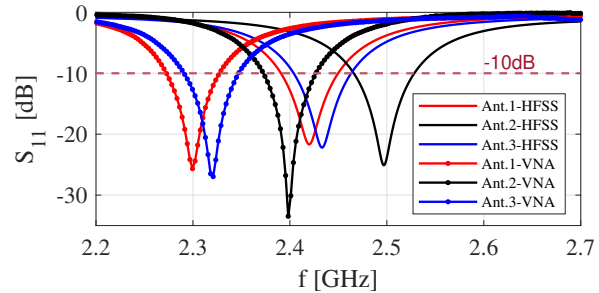


Fig. 7. Comparação entre resultados de perda de retorno para as antenas 1, 2 e 3 otimizadas: Simulados no *software* HFSS e medidos no LiteVNA-64.

Avaliando razão de onda estacionária, foi verificado que as antenas 1, 2 e 3 apresentaram $VSWR = 1,12, 1,04$ e $1,09$, respectivamente, nas frequências de ressonância $2,29\text{ GHz}$, $2,39\text{ GHz}$ e $2,32\text{ GHz}$. Portanto, verifica-se que todas as antenas apresentaram $VSWR$ inferior a 2, sendo esse um requisito mínimo de operação eficiente para antenas de microfita. A antena 1 (com sonda coaxial) apresentou impedância de entrada $Z = 55,13 + 2,71j\ \Omega$, resultando em uma perda de retorno de $-25,15\text{ dB}$ e $BW = 2,2048\%$. A antena 2 (com entalhes no *patch*) apresentou impedância de entrada $Z = 49,44 - 2,14j\ \Omega$, resultando em uma perda de retorno de $-33,02\text{ dB}$ e $BW = 2,1129\%$. Por fim, a antena 3 (com transformador de $1/4$ de onda) apresentou impedância de entrada $Z = 50,10 + 4,61j\ \Omega$, resultando em uma perda de retorno de $-26,73\text{ dB}$ e $BW = 2,2433\%$.

IV. CONCLUSÕES

Os resultados experimentais obtidos via medição mostraram um deslocamento médio de $-0,11\text{ GHz}$ em comparação aos simulados. Tal comportamento pode ser explicado por desvio na constante dielétrica do substrato utilizado. Com o deslocamento, a medição da antena 2 mostrou menor desvio de frequência de $0,01\%$. No entanto, por dificuldade de fabricar a largura adequada do entalhe no *patch*, essa apresentou uma diminuição da largura de banda esperada. Por fim, as medições da antena 3 demonstraram maior BW, além de desempenho adequado em perda de retorno, e fabricação mais simples.

REFERÊNCIAS

- [1] C. A. Balanis, *Antenna Theory: Analysis and Design*, 4th ed., Hoboken, NJ: Wiley, 2016.
- [2] D. M. Pozar and D. H. Schaubert, *Microstrip Antennas: The Analysis and Design of Microstrip Antennas and Arrays*, IEEE Press, 1995.
- [3] M. A. Matin and A. I. Sayeed, "A design rule for inset-fed rectangular microstrip patch antenna," *Proc. of the International Conference on Computer and Communication Engineering*, 2010, pp. 1–4.
- [4] S. Kumar and A. Patnaik, "Comparison of different feeding techniques for rectangular microstrip patch antenna," *2020 IEEE Indian Conference on Antennas and Propagation (InCAP)*, 2020, pp. 1–4.
- [5] A. I. Rachmansyah, & A. B. Mutiara, Designing and manufacturing microstrip antenna for wireless communication at 2.4 GHz . *International Journal of Computer and Electrical Engineering*, 3(5), 670-675, 2011.
- [6] IEEE STANDARDS ASSOCIATION. The evolution of Wi-Fi technology and standards. IEEE SA Beyond Standards, 12 jan. 2023. Disponível em: <https://standards.ieee.org/beyond-standards/the-evolution-of-wi-fi-technology-and-standards/>. Acesso em: 19 maio 2025.

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

Na próxima página encontra-se o arquivo original do artigo intitulado Caracterização numérica e experimental de uma antena *patch* de microfita com geometria bioinspirada na folha *Monstera deliciosa*, apresentado no XLIII Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais – SBrT, realizado em Natal-RN, no ano de 2025.

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@tucuruí.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 Ω , 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.

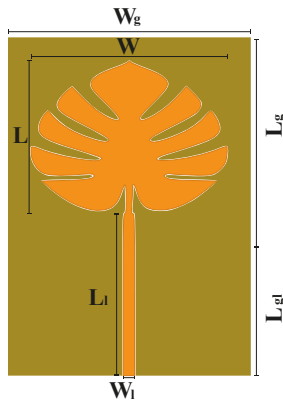


Fig. 2. Projeto da antena *patch* baseada na folha *Monstera deliciosa* com alimentação via linha de microfita.

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.

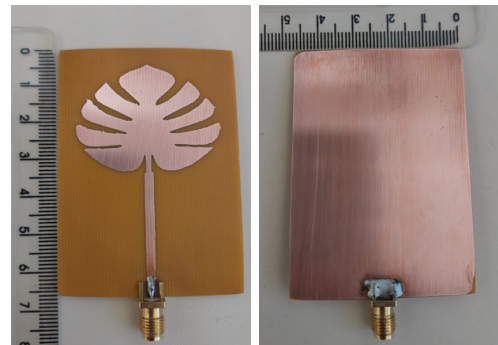


Fig. 4. Antena bioinspirada fabricada: (a) Vista de topo; (b) Vista inferior (plano de terra).

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 50Ω . 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.

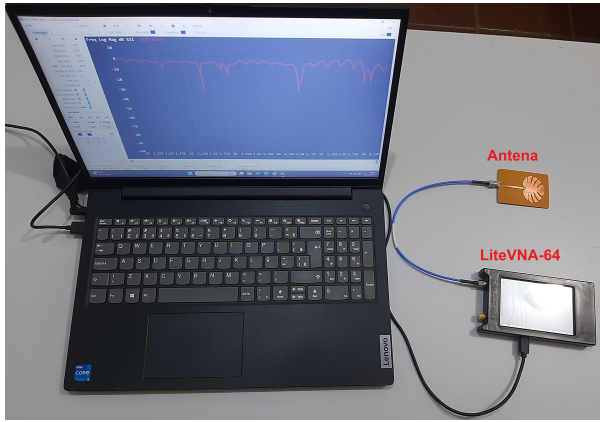


Fig. 5. Setup de medição.

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 .slp 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.

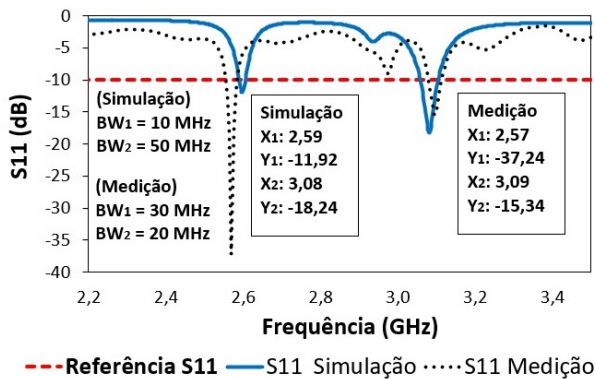


Fig. 6. Comparação entre os resultados simulados e medidos do S_{11} para a antena proposta.

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.

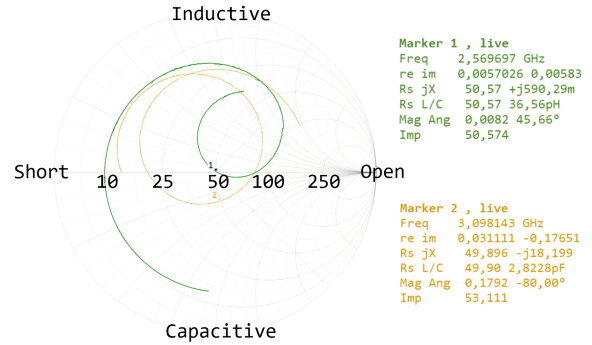


Fig. 7. Carta de Smith para as faixas: 2,4 a 2,6 GHz (em verde), e 3,0 a 3,2 GHz (em laranja).

Na figura 7 o centro da carta indica o casamento de impedâncias em 50Ω . 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 50Ω . 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/IIOT.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.