



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

LEONARDO FRANÇA DA CRUZ

**ANÁLISE E FABRICAÇÃO DE ANTENAS DE MICROFITA *PATCH*  
RETANGULAR: Compilado de artigos publicados em 2024**

TUCURUÍ

2024

LEONARDO FRANÇA DA CRUZ

**ANÁLISE E FABRICAÇÃO DE ANTENAS DE MICROFITA *PATCH*  
RETANGULAR: Compilado de artigos publicados em 2024**

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.<sup>a</sup> Andrécia Pereira da Costa.

TUCURUÍ

2024

**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)**

---

F814a França da Cruz, Leonardo.  
Análise e fabricação de antenas de microfita patch retangular:  
Compilado de artigos publicados em 2024 / Leonardo França da  
Cruz. — 2024.  
22 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. André Felipe Souza da Cruz  
Coorientação: Prof<sup>a</sup>. Dra. Andrécia Pereira da Costa  
Trabalho de Conclusão (Graduação) - Universidade Federal do  
Pará, Campus Universitário de Tucuruí, Faculdade de Engenharia  
Elétrica, Tucuruí, 2024.

1. Antenas de microfita. 2. Micro-ondas. 3. Fabricação  
digital. 4. LiteVNA-64. I. Título.

CDD 621.3

---

Leonardo França da Cruz

**ANÁLISE E FABRICAÇÃO DE ANTENAS DE MICROFITA *PATCH*  
RETANGULAR: Compilado de artigos publicados em 2024**

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: 26/11/2024

**Banca Examinadora:**

---

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

---

**Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Andrécia Pereira da Costa**  
Coorientadora - FEE/CAMTUC/UFPA

---

**Prof. Dr. Janilson Leão de Souza**  
Avaliador Externo - IFPA/UFPA

TUCURUÍ

2024



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

**TÍTULO:** ANÁLISE E FABRICAÇÃO DE ANTENAS DE MICROFITA PATCH  
RETANGULAR: COMPLICADO DE ARTIGOS PUBLICADOS EM 2024

**DISCENTE:** LEONARDO FRANCA DA CRUZ

**MATRÍCULA:** 202033940010

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

**Data da Defesa:** 26/11/2024 | **Hora Início:** 9:00 | **Hora Término:** 10:30

Trabalho Escrito (0 a 10 pontos por critério)	Examinador 1	Examinador 2	Examinador 3
Formatação	9,50	10,00	10,00
Linguagem (gramática e semântica)	9,50	10,00	10,00
Conteúdo técnico	9,75	10,00	10,00

Defesa Oral (0 a 10 pontos por critério)	Examinador 1	Examinador 2	Examinador 3
Sequência lógica de apresentação	10,00	10,00	10,00
Administração do tempo	10,00	10,00	10,00
Expressão oral	9,75	10,00	10,00
Domínio do tema	9,75	10,00	10,00

<b>Média por examinador</b>	9,75	10,00	10,00
<b>Média Final</b>	<b>9,92</b>		
<b>Conceito Final</b>	<b>EXC</b>		

Tucuruí-Pa, 26 de novembro de 2024.

Documento assinado digitalmente  
**gov.br** ANDRE FELIPE SOUZA DA CRUZ  
Data: 27/11/2024 14:14:00-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Orientador

Documento assinado digitalmente  
**gov.br** ANDRE CIA PEREIRA DA COSTA  
Data: 27/11/2024 14:20:51-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Coorientadora

Documento assinado digitalmente  
**gov.br** JANILSON LEAO DE SOUZA  
Data: 27/11/2024 16:07:20-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Membro externo

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço imensamente aos meus familiares, que estiveram ao meu lado em todos os momentos desta caminhada, oferecendo todo o suporte necessário para que eu pudesse concluir o curso.

Aos meus amigos e colegas de turma, pelo companheirismo e apoio nos momentos difíceis. Vocês fizeram essa caminhada mais leve.

Ao corpo docente da Faculdade de Engenharia Elétrica, pela dedicação em transmitir conhecimento e pelas valiosas lições de vida.

Ao meu orientador, Prof. Dr. André Felipe Souza da Cruz, pelos ensinamentos, conselhos e por me abrir as portas para o mundo da pesquisa, contribuindo significativamente para o meu desenvolvimento pessoal e profissional.

Por fim, agradeço a Deus, por me guiar e dar forças ao longo de todo o caminho.

## RESUMO

Neste trabalho, é apresentado um compilado de artigos publicados no ano de 2024, desenvolvidos objetivando o desenvolvimento de uma metodologia para análise paramétrica e confecção de antenas de microfita com *patch* retangular. O primeiro artigo foca principalmente na análise dos efeitos da variação da largura e do comprimento do *patch* retangular na resposta de uma antena de microfita. Essa análise foi realizada a partir de uma antena de referência projetada para operar na frequência de 2,4 GHz, com o *patch* medindo 38,03 mm de largura e 29,47 mm de comprimento, montado sobre um substrato dielétrico FR4, com espessura de 1,5 mm e permissividade relativa de 4,4. Os resultados mostraram que a variação da largura ( $W$ ) do *patch* entre 50 e 200% do valor de referência aumenta a perda de retorno, mas também desloca a frequência de ressonância de 2,51 GHz para 1,92 GHz. Já a variação no comprimento ( $L$ ) do *patch* indicou que apenas a antena com o dobro do valor de referência apresenta uma largura de banda útil na frequência de 2,42 GHz. O segundo artigo apresenta dois métodos de fabricação de antenas de microfita e compara sua viabilidade e eficácia. A primeira antena foi fabricada utilizando uma microfresadora CNC, e a segunda, pelo método de corrosão com perclorato de ferro. Após a fabricação, a perda de retorno e o VSWR das antenas foram medidos usando o analisador de redes LiteVNA-64 e comparados com as simulações realizadas no *software Ansys HFSS*. Os artigos demonstraram a viabilidade de aplicar procedimentos de fabricação digital de antenas de microfita em laboratórios acadêmicos, utilizando métodos didáticos e acessíveis.

**Palavras-chave:** Antenas de microfita; micro-ondas; fabricação digital; LiteVNA-64.

## ABSTRACT

This work presents a compilation of articles published in 2024, aiming to develop a methodology for the parametric analysis and fabrication of microstrip antennas with a rectangular *patch*. The first article primarily focuses on analyzing the effects of varying the width and length of the rectangular *patch* on the performance of a microstrip antenna. This analysis was based on a reference antenna designed to operate at 2.4 GHz, with a *patch* measuring 38.03 mm in width and 29.47 mm in length, mounted on an FR4 dielectric substrate with a thickness of 1.5 mm and a relative permittivity of 4.4. The results showed that varying the *patch* width (W) between 50 and 200% of the reference value increases the return loss but also shifts the resonance frequency from 2.51 GHz to 1.92 GHz. On the other hand, varying the *patch* length (L) indicated that only the antenna with double the reference length exhibits a usable bandwidth at 2.42 GHz. The second article presents two fabrication methods for microstrip antennas and compares their feasibility and effectiveness. The first antenna was fabricated using a CNC micro-milling machine, and the second, through a corrosion method with ferric chloride. After fabrication, the return loss and VSWR of the antennas were measured using the LiteVNA-64 network analyzer and compared with simulations performed in the *Ansys HFSS* software. The articles demonstrated the feasibility of applying digital fabrication procedures for microstrip antennas in academic laboratories, using accessible and didactic methods.

**Keywords:** *Microstrip antennas; microwaves; digital fabrication; LiteVNA-64.*

## SUMÁRIO

1	TEXTO DE APRESENTAÇÃO . . . . .	9
	ANEXO A – ANÁLISE NUMÉRICA DE UMA ANTENA DE MICROFITA COM <i>PATCH</i> RETANGULAR .	11
	ANEXO B – FABRICAÇÃO DE ANTENA <i>PATCH</i> POR MÉ- TODOS DE CORROSÃO E USINAGEM E CA- RACTERIZAÇÃO COM O LITEVNA-64 . . . . .	19

## 1 TEXTO DE APRESENTAÇÃO

Atualmente, as tecnologias baseadas em micro-ondas e radiofrequência estão mais disseminadas do que nunca, especialmente no setor comercial. Exemplos disso incluem smartphones, redes 5G e Wi-Fi, sensores de colisão por ondas milimétricas para veículos, satélites de transmissão de rádio e sinais de televisão, além de sistemas de sensoriamento remoto para dispositivos RFID. Diante desse cenário, os desafios para a engenharia de micro-ondas no futuro próximo são evidentes, o que ressalta a crescente demanda por engenheiros que compreendam os fundamentos dos dispositivos eletromagnéticos e saibam aplicar esse conhecimento a problemas práticos.

O conceito de antenas de microfita começou a ganhar destaque na comunidade acadêmica no início dos anos 1970, com o surgimento de demandas aeroespaciais, como naves espaciais e mísseis, que necessitavam de dispositivos de transmissão incorporados em suas fuselagens. Embora essas antenas inicialmente enfrentassem certa resistência devido à baixa eficiência de radiação e à largura de banda estreita, essas limitações não impediram sua adoção. Pelo contrário, as antenas de microfita tornaram-se amplamente utilizadas e continuam sendo objeto de estudo até hoje.

A geometria de uma antena de microfita é composta basicamente por um *patch* condutivo, localizado sobre a superfície superior de um material dielétrico. Essa área condutora, que forma o elemento radiador, geralmente possui formato retangular ou circular, embora possa adotar outros formatos conforme necessário.

Durante a graduação, o autor deste trabalho desenvolveu, no Laboratório de Eletromagnetismo (LEMAG) do Campus Universitário de Tucuruí, da Universidade Federal do Pará (CAMTUC - UFPA), pesquisas focadas no estudo paramétrico de antenas de microfita com *patch* retangular. O objetivo principal era criar uma metodologia completa para o projeto dessas antenas. Para isso, foi realizado um estudo aprofundado sobre o comportamento eletromagnético das antenas em função de suas dimensões, a fim de gerar uma base de dados robusta que ajudasse a otimizar o desempenho desses dispositivos. Após a simulação e análise, as antenas foram fabricadas em colaboração com o Laboratório de Fabricação Digital (FABLAB), do CAMTUC - UFPA, utilizando dois métodos: usinagem via micro fresadora CNC, e corrosão com perclorato de ferro a partir de uma máscara preparada utilizando CNC laser.

Os resultados obtidos com as medições realizadas, utilizando um analisador de rede vetorial do tipo Lite VNA-64, foram comparados com as simulações feitas no *software Ansys HFSS (High-Frequency Simulation Software)*, permitindo avaliar a resposta das antenas estudadas.

Em 2024, o artigo intitulado “Análise numérica de uma antena de microfita com *patch* retangular” foi publicado na 16ª edição do Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo – CBMAG, esse projeto de pesquisa foi financiado pelo CNPq por meio do programa de apoio ao doutor pesquisador (PRODOUTOR-PARD 2023), IC PRO6432-2023. Esse trabalho apresenta um estudo sobre a influência da variação nas dimensões do *patch* retangular na resposta de uma antena projetada para operar na frequência de 2,4 GHz. No estudo, foi proposta a variação de 50% a 200% tanto na largura quanto no comprimento da antena, em relação a um projeto de referência. Os efeitos dessas variações foram analisados em relação a parâmetros como perda de retorno, VSWR, impedância de entrada e diagrama de radiação.

Ainda em 2024, o artigo intitulado “Fabricação de antena *patch* por métodos de corrosão e usinagem e caracterização com Lite VNA-64” (DOI: 10.14209/sbrt.2024.1571032848) foi publicado no XLII Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais – SBRT, este projeto foi parcialmente financiado pela fundação amazônia de amparo a estudos e pesquisas (FAPESPA projeto PRO6432-2023). Nesse trabalho, foram apresentados dois métodos de fabricação de antenas em laboratórios acadêmicos, com caracterização e medições realizadas por meio do analisador de redes portátil Lite VNA-64. Este equipamento foi escolhido por ser de baixo custo e por permitir medições fora de ambientes laboratoriais tradicionais.

Os trabalhos se complementam, pois a primeira publicação forneceu aos autores uma base de dados sólida e uma orientação clara para projetar uma antena com *patch* retangular de alta qualidade. Com essa experiência, foi possível realizar a confecção das antenas presentes no segundo artigo. Sem o estudo e as simulações iniciais, a fabricação desses dispositivos teria demandado mais tempo e gerado mais incertezas na avaliação final dos resultados. Assim, pode-se concluir que os dois trabalhos são interligados, já que o segundo artigo corrobora os resultados simulados no primeiro, evidenciando que a metodologia desenvolvida pelos autores é válida e aplicável a projetos futuros.

As principais dificuldades enfrentadas na realização desses artigos estão relacionadas ao caráter pioneiro dos trabalhos, já que foram um dos primeiros na UFPA – Campus de Tucuruí, a abordar a simulação e a produção de antenas de microfita. O desenvolvimento das metodologias de projeto em ambiente simulado, bem como a fabricação, exigiu tempo e dedicação dos autores, dada a complexidade de iniciar uma nova linha de pesquisa.

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

Na próxima página encontra-se o arquivo original do artigo intitulado Análise numérica de uma antena de microfita com *patch* retangular, apresentado na 16ª edição do Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo – CBMAG, realizado em formato remoto, no ano de 2024.

# Análise numérica de uma antena de microfita com *patch* retangular

Leonardo França da Cruz  
Curso de Engenharia Elétrica  
Universidade Federal do Pará  
Tucuruí, Pará, Brasil  
leonardo.cruz@tucuruui.ufpa.br

Samantha Mota Pinto  
Curso de Engenharia Elétrica  
Universidade Federal do Pará  
Tucuruí, Pará, Brasil  
eng.smota@outlook.com

Karlo Queiroz da Costa  
Instituto de Tecnologia  
Universidade Federal do Pará  
Belém, Pará, Brasil  
karlo@ufpa.br

Andrécia Pereira da Costa  
Faculdade de Engenharia Elétrica  
Universidade Federal do Pará  
Tucuruí, Pará, Brasil  
andreciacosta@ufpa.br

André Felipe Souza da Cruz  
Faculdade de Engenharia Elétrica  
Universidade Federal do Pará  
Tucuruí, Pará, Brasil  
andacruz@ufpa.br

**Resumo**—Neste trabalho é apresentada uma análise sobre os efeitos das variações na largura e no comprimento do *patch* retangular na resposta de uma antena de microfita. Para realizar tal estudo, foi proposto o projeto de uma antena de referência para operar na frequência de 2,4 GHz. O *patch* da antena de referência possui 38,03 mm de largura e 29,47 mm de comprimento, está depositado sobre um substrato dielétrico de fibra de vidro FR4, com espessura 1,5 mm, permissividade relativa de 4,4. A estrutura foi desenvolvida com o uso do *software High Frequency Structure Simulator (HFSS)* da ANSYS, com alimentação realizada por uma linha de microfita planar para conectar a *Modal Lumped Port* com impedância de 50  $\Omega$ . Para melhoria do casamento de impedâncias entre o *patch* e a linha de microfita, utilizou-se o método de inserção de cavidades retangulares na entrada do *patch*. A antena de referência apresentou perda de retorno de -29,94 dB na frequência 2,39 GHz, com largura de banda 58,52 MHz. Os resultados mostram que a variação da largura  $W$  do *patch* em 50 a 200 % do valor de referência aumenta a Perda de Retorno, contudo, produz um efeito de deslocar a frequência de ressonância de 2,51 GHz para 1,92 GHz. A variação no comprimento  $L$  do *patch* demonstrou que apenas a antena com o dobro do valor de referência produz largura de banda útil na frequência 2,42 GHz.

**Palavras-chave**—Antenas de microfita, métodos numéricos, HFSS, micro-ondas.

## I. INTRODUÇÃO

Uma antena é definida como um dispositivo para a radiação ou a recepção de ondas eletromagnéticas [1]. Estes dispositivos são fundamentais para os sistemas de radiocomunicação, pois tem o papel de ser a estrutura intermediária entre o espaço livre e uma linha de transmissão [2]. Dentro deste contexto, as antenas de microfita, também conhecidas como antenas *patch*, têm se destacado [3]. Tais antenas são amplamente utilizadas em várias aplicações nos sistemas de comunicação sem fio, por serem muito versáteis, discretas, adaptáveis a superfícies

planas e não-planas, e sua construção é simples e acessível com a tecnologia de circuitos impressos [4] [5] [6].

Estudos recentes mostram o desenvolvimento de antenas de microfita para aplicação em comunicação sem fio *WLAN* (*Wireless Local Area Network*) – na faixa de 2,4 GHz, e tecnologia 4 G e 5 G em sistemas de telefonia móvel [7] multibanda. Em [8] é proposta uma antena com alto ganho e polarização dupla para operação em redes celulares nas faixas de frequência de 3,5 GHz. Essas antenas também são aplicadas em geometrias mais complexas, como em [9], onde é proposta uma antena de microfita baseado em fractais quadrangulares, que constituem uma classe nova de figuras geométricas planas.

No caso específico das antenas com *patch* retangular, um estudo paramétrico relacionado a variação das suas dimensões é fundamental para que se possa propor antenas mais complexas, já que a variação nas dimensões do *patch* pode influenciar diretamente na resposta eletromagnética destes dispositivos. A capacidade de escolher adequadamente o comprimento e a largura do *patch* permite identificar configurações ideais para atender um determinado projeto, além de otimizar o desempenho da antena, influenciando diretamente na perda de retorno, impedância de entrada, frequência de ressonância, taxa de onde estacionária e diagrama de radiação.

Este trabalho apresenta um estudo sobre a influência da variação das dimensões de um *patch* retangular na resposta de uma antena de microfita projetada para operar na frequência de 2,4 GHz. Neste estudo, é proposto variar de 50 a 200 % tanto a largura, quanto o comprimento da antena, em torno dos valores da antena de referência. Verificou-se os efeitos destas variações sobre os principais aspectos da resposta da antena: perda de retorno, VSWR, impedância de entrada e diagrama de radiação. A partir da análise realizada, foi possível formular um banco de dados que poderá ser futuramente utilizado como fonte de embasamento para proposição de geometrias complexas.

---

Este projeto de pesquisa está sendo financiado pelo CNPq por meio do programa PRODOUTOR-PARD 2023, (IC) PRO6432-2023

## II. PROJETO DE ANTENA *Patch* RETANGULAR

A antena de referência do estudo de caso foi projetada para operar na frequência de 2,4 GHz por meio do procedimento de projeto apresentado em [6]. Na rotina de projeto, pede-se a especificação da frequência de ressonância esperada  $f_r$ , a permissividade relativa  $\epsilon_r$  e a espessura  $h$  do substrato. Com essas informações, determinou-se a largura  $W = W_0$  e o comprimento  $L = L_0$  do *patch* retangular.

Para alimentar a antena utilizou-se uma linha de microfita com largura  $W_{guia}$ , todavia, como é proposto por [6], o *patch* retangular convencional conectado a linha de microfita produz um casamento de impedâncias insatisfatório. Para contornar tal problema, foram inseridas cavidades de comprimento  $L_{cav}$  e abertura  $g$  na entrada da antena. Um modelo de antena de microfita com *patch* retangular é mostrado na Fig. 1.

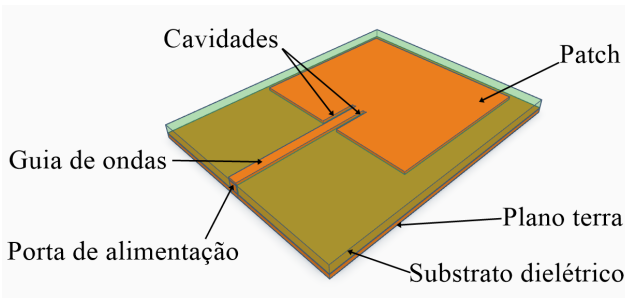


Fig. 1: Antena com *patch* retangular com cavidades na entrada de alimentação da linha de microfita.

A frequência de ressonância desejada para o projeto é de 2,4 GHz. O material escolhido para o substrato foi o FR4, com constante dielétrica  $\epsilon_r = 4,4$ , espessura  $h = 1,5 \text{ mm}$  e tangente de perdas de 0,02. De posse dessas especificações, foi calculado a largura  $W_0$  do *patch* de referência por (1).

$$W_0 = \frac{c}{2f_r} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad (1)$$

Para calcular o comprimento do *patch* é necessário obter a variação  $\Delta L$  (2) produzida pelo efeito de franjamento, e o comprimento efetivo  $L_{ef}$  (3), ambos calculados a partir da permissividade relativa efetiva  $\epsilon_{r_{ef}}$  (4) na estrutura.

$$\Delta L = 0,412h \left[ \frac{\epsilon_{r_{ef}} + 0,300}{\epsilon_{r_{ef}} - 0,258} \right] \left[ \frac{W/h + 0,264}{W/h + 0,800} \right] \quad (2)$$

$$L_{ef} = \frac{c}{2f_r \sqrt{\epsilon_{r_{ef}}}} \quad (3)$$

$$\epsilon_{r_{ef}} = \frac{(\epsilon_r + 1)}{2} + \frac{(\epsilon_r - 1)}{2} \left[ 1 + 12 \frac{h}{W} \right]^{-1/2} \quad (4)$$

A partir destes, o comprimento  $L_0$  do *patch* de referência é calculado em (5).

$$L_0 = L_{ef} - 2 \cdot \Delta L \quad (5)$$

O comprimento da cavidade  $L_{cav}$  é obtido utilizando o procedimento definido em [10]:

$$L_{cav} = \frac{L_0}{\pi} \cos^{-1} \left( \sqrt{2Z_{in}^{esp} (G_1 + G_{12})} \right) \quad (6)$$

em que  $Z_{in}^{esp} = 50 \Omega$  é a impedância de entrada esperada,  $G_1$  e  $G_{12}$  são, respectivamente, a transcondutância própria e a transcondutância mútua, calculadas a partir de (7) e (8).

$$G_1 = \frac{1}{120\pi^2} \left[ -2 + \cos \alpha + \alpha \text{Si}(\alpha) + \frac{\sin(\alpha)}{\alpha} \right] \quad (7)$$

$$G_{12} = \frac{1}{120\pi^2} \int_0^\pi \left[ \frac{\sin(0,5\alpha \cos \theta)}{\cos \theta} \right]^2 J_0(k_0 L_0 \sin \theta) \sin^3 \theta d\theta \quad (8)$$

em que  $\alpha = k_0 W_0$ , com  $k_0 = 2\pi/\lambda$ , e  $\text{Si}(\alpha)$  é a função Seno Integral e  $J_0(k_0 L_0 \sin \theta)$  é a função de Bessel do tipo 1 de ordem zero. A largura  $g$  da cavidade foi aproximada pela abordagem utilizada em [7]:

$$g = \frac{c}{\sqrt{2\epsilon_{r_{ef}}}} \frac{4,65 \times 10^{-12}}{f_r} \frac{10^{-3}}{10^{-9}} \quad (9)$$

A partir das equações definidas de (1) a (9), foi possível calcular as dimensões do *patch* de referência, resultando em largura de  $W_0 = 38,03 \text{ mm}$ , comprimento  $L_0 = 29,47 \text{ mm}$ , cavidade com comprimento de  $L_{cav} = 10,93 \text{ mm}$  e largura de  $g = 0,203 \text{ mm}$ .

Para alimentar a antena utilizou-se uma linha de microfita de comprimento  $L_l = \lambda/4 = 31,25 \text{ mm}$ . Para atender as especificações de projeto, deseja-se que a linha de microfita possua impedância característica de  $Z_l = 50 \Omega$ , que é função da largura  $W_l$ . A relação  $Z_l(W_l)$  é definida por [2]:

$$Z_l = \begin{cases} \frac{60}{\sqrt{\epsilon_{r_{ef}}}} \ln \left[ \frac{8h}{W_l} + \frac{W_l}{4h} \right], & W_l \leq h \\ \left( \frac{120\pi}{\sqrt{\epsilon_{r_{ef}}}} \left( \frac{W_l}{h} + 1,393 + 0,667 \ln \left[ \frac{W_l}{h} + 1,444 \right] \right) \right)^{-1}, & W_l > h \end{cases} \quad (10)$$

Na Fig. 2 é mostrada a impedância característica da linha de microfita em função da sua largura.

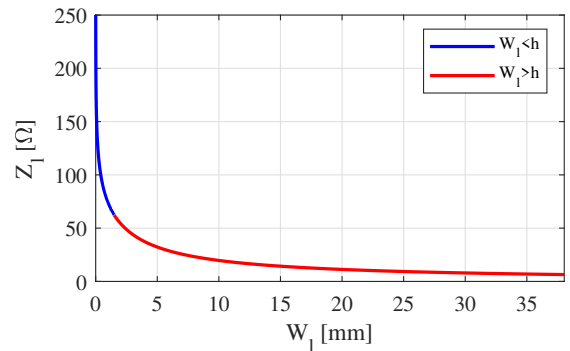


Fig. 2: Impedância característica da linha para  $0 < W_l < W_0$ .

Pode-se simplesmente inverter a Eq. (10) numericamente para obter a largura da linha de transmissão igual a  $W_l = 2,38 \text{ mm}$ .

A Fig. 3 apresenta o esquema de parâmetros geométricos da antena de referência. Nesta,  $W = W_0$  e  $L = L_0$  são, respectivamente, a largura e o comprimento do *patch*,  $g$  e  $L_{cav}$  representam a largura e o comprimento das cavidades na entrada da antena,  $W_l$  e  $L_l$  são, respectivamente, a largura e o comprimento da linha de microfita,  $W_g$  e  $L_g$  são, respectivamente, a largura e o comprimento da porção retangular do plano de terra centralizado abaixo do *patch*,  $L_{gl}$  é a porção do plano de terra abaixo da linha de microfita, e  $h$  é a espessura do substrato que separa o *patch* e o plano de terra.

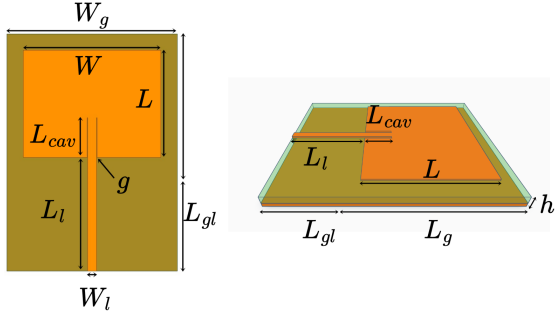


Fig. 3: Esquema da antena *patch* retangular de referência: (a) Vista frontal; (b) Vista lateral.

A partir da antena de referência, indicada na Fig. 3, foi proposto a análise da resposta eletromagnética de dois conjuntos de antenas, no primeiro manteve-se o comprimento da antena de referência  $L = L_0$  e variou-se de 50 a 200 % a largura do *patch*. No segundo conjunto de antenas, manteve-se a largura da antena de referência  $W = W_0$  e variou-se de 50 a 200 % o comprimento do *patch*.

Para cada antena nos conjuntos 1 e 2, o comprimento e a largura da geometria retangular do plano de terra centralizado abaixo do *patch* foram calculados a partir das Eq. (11) e (12) [11].

$$L_g = 6h + L \quad (11)$$

$$W_g = 6h + W \quad (12)$$

O plano de terra abaixo da linha de microfita tem largura  $W_g$  e seu comprimento pode se calculado por  $L_{gl} = L_l - (L_g - L)/2$ . As dimensões da antena *patch* retangular de referência são apresentados na Tabela I.

TABELA I: ESPECIFICAÇÕES DA ANTENA DE REFERÊNCIA

Nome	Parâmetro	(mm)
Largura do <i>patch</i>	$W = W_0$	38,036
Comprimento do <i>patch</i>	$L = L_0$	29,477
Largura da linha	$W_l$	2,384
Comprimento da linha	$L_l$	31,250
Comprimento da cavidade	$L_{cav}$	10,936
Largura da cavidade (gap)	$g$	0,203
Largura do <i>ground</i>	$W_g = 6h + W$	47,036
Comprimento do <i>ground</i>	$L_g = 6h + L$	38,477
Comp. <i>ground</i> abaixo da linha	$L_{gl} = L_l - (L_g - L)/2$	26,750

Na Fig. 4 é mostrado o primeiro conjunto de antenas com comprimento fixo, enquanto na Fig. 5 pode ser visto o segundo conjunto com largura fixa.

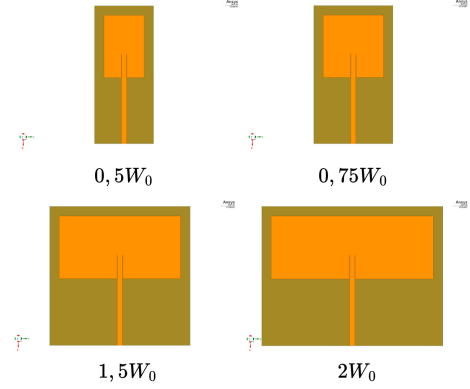


Fig. 4: Conjunto de antenas 1:  $L = L_0$ , com  $W = 0,5W_0$ ,  $0,75W_0$ ,  $W_0$ ,  $1,5W_0$  e  $2W_0$ .

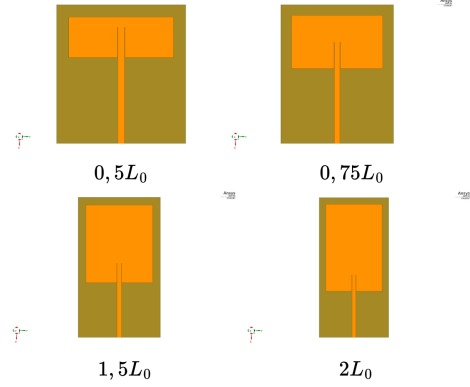


Fig. 5: Conjunto de antenas 1:  $W = W_0$ , com  $L = 0,5L_0$ ,  $0,75L_0$ ,  $L_0$ ,  $1,5L_0$  e  $2L_0$ .

### III. SIMULAÇÕES

O projeto da antena proposta foi simulado utilizando o *software High Frequency Structure Simulator (HFSS)* fornecido pela ANSYS [12]. A plaqueta da antena foi projetada para estar localizada na origem do plano  $x - y$ , a altura do substrato está disposta ao longo do eixo  $z$ . As condições de contorno definidas para o plano terra e a plaqueta, foram escolhidas levando em consideração esses planos como condutores elétricos perfeitos (PEC). A caixa de radiação foi dimensionada para envolver toda a antena a uma distância maior que duas vezes  $\lambda/4$  partindo da borda do substrato, tanto em largura, comprimento e altura.

A alimentação da antena foi conectada à entrada da linha de transmissão e ao plano de terra abaixo da linha, utilizando uma excitação do tipo *Modal Lumped Port*, com impedância de configurada para  $50 \Omega$ .

A frequência de varredura tem uma distribuição de passos linear, com um ponto de partida em 1,5 GHz e ponto de parada em 3 GHz. O tamanho do passo é de 0,0001 GHz, totalizando 15001 pontos de varredura. As configurações do *Drive Solution Setup* no *software* do HFSS foram escolhidas como descrito em Tabela II.

TABELA II: CONFIGURAÇÕES DA MALHA PARA 2,4 GHz

Frequency	2,4GHz
Maximum Number of Passes	20
Maximum Delta S	0.02
Sweep Type	fast

No primeiro conjunto de antenas, foi mantido o comprimento de referência  $L = 29,47 \text{ mm}$ , enquanto a largura foi variada em  $W = 19,01 \text{ mm}$ ,  $28,52 \text{ mm}$ ,  $38,03 \text{ mm}$ ,  $57,04 \text{ mm}$  e  $76,07 \text{ mm}$ . No segundo conjunto, manteve-se a largura  $W = 38,03 \text{ mm}$ , enquanto o comprimento foi ajustado em  $L = 14,73 \text{ mm}$ ,  $22,10 \text{ mm}$ ,  $29,47 \text{ mm}$ ,  $44,21 \text{ mm}$  e  $58,95 \text{ mm}$ . Em todos os casos as dimensões da linha de microfita e das cavidas foram mantidas conforme a Tabela I, enquanto as dimensões do plano de terra  $W_g$ ,  $L_g$ , e  $L_{gl}$  foram ajustadas em função das dimensões do *patch*.

#### IV. RESULTADOS

As simulações foram realizadas buscando verificar as alterações na resposta da antena ao variar o comprimento e a largura do *patch*. A maioria das análises foram realizadas na faixa de 1,5 GHz a 3 GHz, onde verificou-se os efeitos de deslocamento da frequência de ressonância, variação na perda de retorno e no diagrama de radiação da antena.

A Fig. 6 apresenta a perda de retorno  $S_{11}$ , dB para o primeiro conjunto de antenas, mantendo  $L = L_0$ , e variando  $W$  de 50 a 200 % de  $W_0$ .

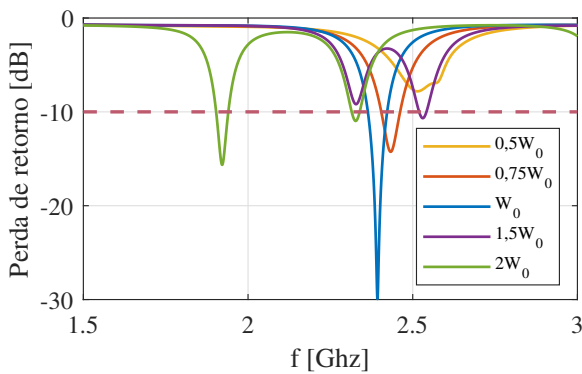


Fig. 6: Perda de Retorno  $S_{11}$ , dB para quatro antenas com comprimento  $L_0 = 29,47 \text{ mm}$  e variando a largura de 50 a 200 % de  $W_0 = 38,03 \text{ mm}$ .

A antena de referência apresentou perda de retorno de -29,94 dB na frequência  $f_r \approx 2,39 \text{ GHz}$ , com largura de banda (BW) de  $BW = 58,52 \text{ MHz}$ .

A antena com  $W = 0,5W_0$  possui frequência de ressonância de 2,51 GHz, com uma perda de retorno de -7,80 dB. Contudo, como a perda de retorno não atingiu o mínimo de -10 dB, esta antena não apresentou largura de banda utilizável. Aumentado a largura para  $W = 0,75W_0$  percebe-se uma frequência de ressonância de 2,43 GHz, com perda de retorno de -14,25 dB e largura de banda de 57,16 MHz. Passando pela antena de referência, e aumentando a largura para  $W = 1,5W_0$  há o aparecimento de duas frequências de ressonância, em 2,32 GHz e a segunda em 2,53 GHz, com perda de retorno de -9,18 dB e -10,66 dB, respectivamente. Assim, apenas a segunda ressonância possui uma largura de banda mínima de 22,13 MHz. A antena com largura  $W = 2W_0$  também apresentou duas ressonâncias, em 1,92 GHz e 2,32 GHz, respectivamente, com perda de retorno de -15,64 dB e -10,96 dB, produzindo as larguras de banda de 36,95 MHz e 24,18 MHz.

Os resultados mostram um aumento substancial da perda de retorno ao variar a largura da antena. Contudo, é possível notar uma tendência de diminuição da frequência de ressonância ao aumentar a largura do *patch*. Pode ser evidenciado as frequências de ressonância do modo fundamental da antena próximas de 2,4 GHz na Fig. 7.

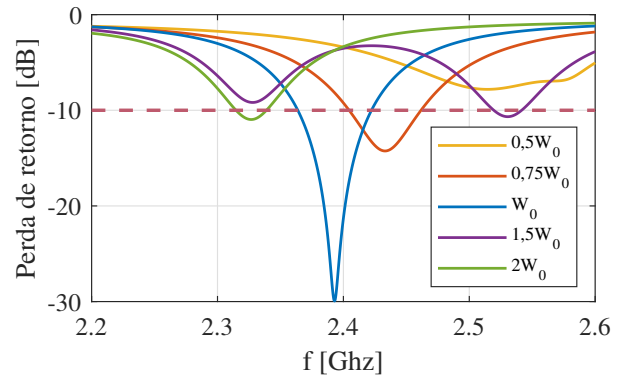


Fig. 7: Perda de Retorno  $S_{11}$ , dB para o primeiro conjunto de antenas na faixa de 2,2 a 2,6 GHz.

A tendência ilustrada na Fig 7 é corroborada pela equação (1), onde a frequência de ressonância diminui à medida em que a largura da antena é aumentada, comparação feita na Fig. 8.

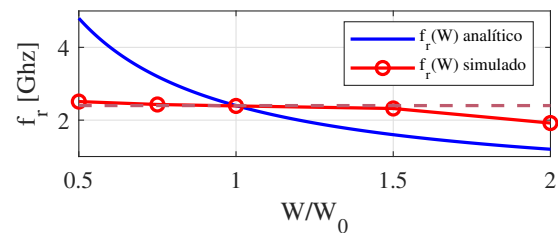


Fig. 8: Comparação entre frequências de ressonância simuladas e calculadas em (1).

Observa-se na Fig. 9 a perda de Retorno  $S_{11}$ , dB para o primeiro conjunto de antenas, mantendo  $W = W_0$ , e variando  $L$  de 50 a 200 % de  $L_0$ .

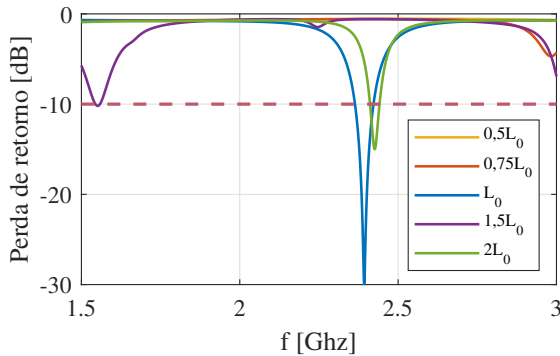


Fig. 9: Perda de Retorno  $S_{11}$ , dB para quatro antenas com largura  $W_0 = 38,03 \text{ mm}$  e variando o comprimento de 50 a 200 % de  $L_0 = 29,47 \text{ mm}$ .

Ao dividir o comprimento da antena de referência por dois ( $L = 0,5L_0$ ), verifica-se que a antena não ressoa na faixa de 1,5 GHz a 3 GHz. Ao aumentar o comprimento para  $L = 0,75L_0$ , é possível notar uma ressonância em 2,98 GHz com perda de retorno de -4,7 dB, não possuindo banda útil. Para o comprimento  $L = 1,5L_0$  há um modo ressonante em 1,55 GHz, com perda de retorno de -10,19 dB, e largura de banda de 14,32 MHz. O melhor resultado é obtido para a antena com o dobro do comprimento ( $L = 2L_0$ ), que tem frequência de ressonância de 2,42 GHz, com perda de retorno de -14,99 dB e largura de banda de 29,94 MHz.

A partir do resultado da Fig. 9 é possível constatar que não há um comportamento de tendência ao aumentar o comprimento da antena. Nota-se apenas a peculiaridade de que, ao se dobrar o comprimento da antena, tanto a perda de retorno quanto a largura de banda diminuiram pela metade.

É exibido na Fig. 10 o VSWR para o primeiro conjunto de antenas, onde é mantido o comprimento do *patch* de referência.

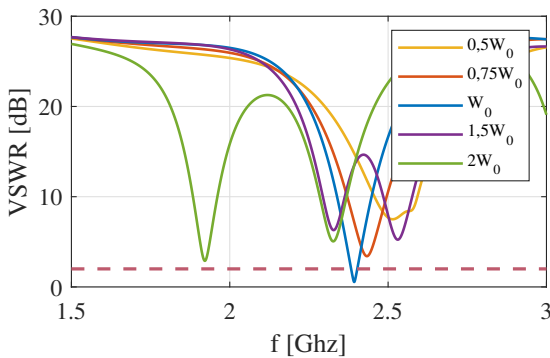


Fig. 10: VSWR para *patch* com  $L_0 = 29,47 \text{ mm}$  e  $W = 0,5W_0, 0,75W_0, W_0, 1,5W_0$  e  $2W_0$ .

Ao variar a largura do *patch*, verifica-se os valores de razão de onda estacionária de tensão (VSWR): 7,5 dB para  $0,5W_0$ , 3,4 dB para  $0,75W_0$ , 0,55 dB para  $W_0$ , 6,29 dB para  $1,5W_0$  e 2,89 dB para  $2W_0$ , em suas respectivas frequências de ressonância: 2,51 GHz, 2,43 GHz, 2,39 GHz, 2,32 GHz e 1,92 GHz. Nota-se que apenas a antena de referência apresenta VSWR menor que 2 dB, que é requisito mínimo para uma operação eficiente da antena, com o mínimo de ondas estacionárias na linha de microfita. Deste modo, apenas a antena de referência e a antena com  $2W_0$ , possuem VSWR com níveis aceitáveis.

Na Fig. 11 é visualizado o VSWR para o segundo conjunto de antenas, onde é mantida a largura do *patch* de referência e variado o comprimento.

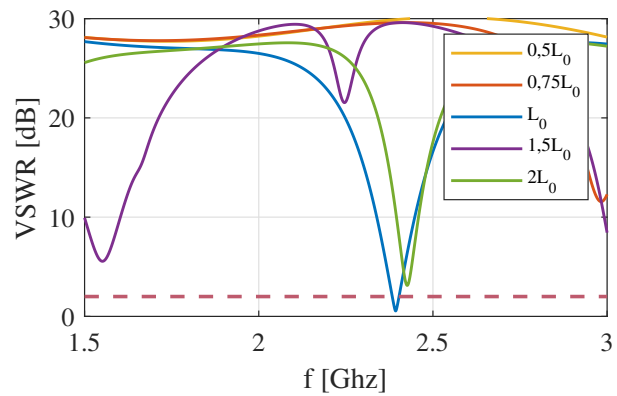


Fig. 11: VSWR para *patch* com  $W_0 = 38,03 \text{ mm}$  e  $L = 0,5L_0, 0,75L_0, L_0, 1,5L_0$  e  $2L_0$ .

É comprovado pela Fig. 11 que apenas a antena *patch* com o dobro do comprimento da antena de referência apresenta resposta próxima do valor de VSWR aceitável, sendo 3,12 dB na frequência 2,42 GHz.

O diagrama da radiação 3D para a antena de referência na frequência de ressonância 2,39 GHz é visto na Fig. 12.

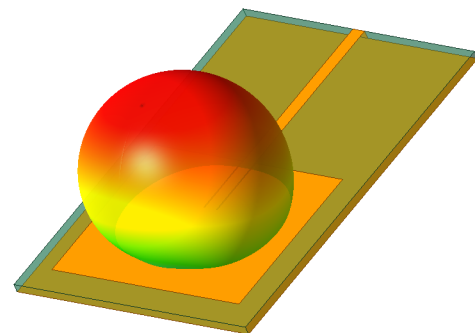


Fig. 12: Diagrama de radiação 3D para antena de referência  $W = W_0$  e  $L = L_0$ .

Pode-se verificar que a antena de referência apresenta um diagrama de radiação na direção perpendicular ao plano de terra.

Para a antena *patch* com  $L = 2L_0$ , na frequência de ressonância 2,42 GHz, o diagrama de radiação é ilustrado na Fig. 13.

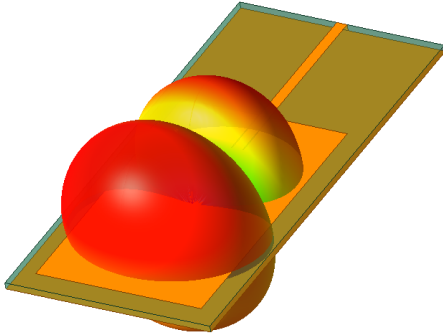


Fig. 13: Diagrama de radiação 3D para antena com  $W = W_0$  e  $L = 2L_0$ .

Apesar da antena ressoar na frequência próxima de 2,4 GHz, o diagrama de radiação é do tipo *endfire* ao longo da antena.

A Fig. 14 mostra os efeitos da variação da largura da antena no diagrama de campo distante no plano  $E$  ( $\phi = 0^\circ$ ).

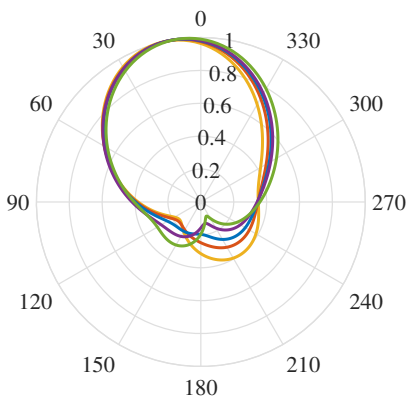


Fig. 14: Diagrama de radiação normalizado no plano  $E$  ( $\phi = 0^\circ$ ). Linha amarela:  $0,5W_0$ ; linha laranja:  $0,75W_0$ ; linha azul:  $W_0$ ; linha roxa  $1,5W_0$ ; linha verde:  $2W_0$ .

A partir da Fig. 14 verifica-se que a medida que a largura do *patch* aumenta de  $0,5W_0$  a  $2W_0$ , a largura de feixe assume respectivamente os valores:  $86^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $92^\circ$ ,  $94^\circ$  e  $96^\circ$ , demonstrando um aumento na largura de feixe no plano  $E$ . É possível notar também que o aumento na largura do *patch* provoca uma diminuição de um lóbulo secundário localizado no ângulo de  $215^\circ$ , que fica oposto à linha de transmissão, e na região abaixo do plano de terra.

A Fig 15 ilustra o diagrama de radiação no plano  $H$  ( $\phi = 90^\circ$ ).

A partir da Fig. 15 é possível notar que a largura de feixe, no plano  $H$ , tende a diminuir a medida que a largura da antena é aumentada de  $0,5W_0$  a  $2W_0$ , assumindo respectivamente os valores:  $154^\circ$ ,  $132^\circ$ ,  $116^\circ$ ,  $92^\circ$  e  $72^\circ$ .

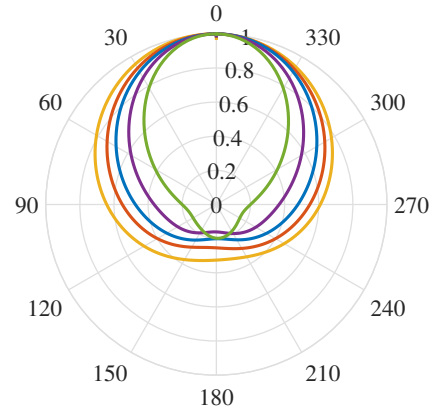


Fig. 15: Diagrama de radiação normalizado no plano  $H$  ( $\phi = 90^\circ$ ). Linha amarela:  $0,5W_0$ ; linha laranja:  $0,75W_0$ ; linha azul:  $W_0$ ; linha roxa  $1,5W_0$ ; linha verde:  $2W_0$ .

Com base nessa análise pode-se inferir que aumentar a largura do *patch* produz um efeito de aumentar a largura de feixe no plano  $E$ , e efeito contrário para o plano  $H$ .

Ao avaliar a impedância de entrada das antenas do conjunto 1, verificou-se que nas frequências de ressonância, cada antena apresentou as seguintes impedâncias de entrada:  $Z_{ent} = 34,19 - j33,26 \Omega$  para  $0,5W_0$ ;  $Z_{ent} = 50,56 - 19,85 \Omega$  para  $0,75W_0$ ;  $Z_{ent} = 49,23 + 3,06 \Omega$  para  $W_0$ ;  $Z_{ent} = 36,87 + 28,99 \Omega$  para  $1,5W_0$ ;  $Z_{ent} = 69,24 + 4,11 \Omega$  para  $2W_0$ . Nota-se um comportamento capacitivo para as antenas com largura menor que da antena de referência, e impedância indutiva para antenas com largura maior que a antena de referência.

## V. CONCLUSÃO

Neste trabalho buscou-se apresentar uma análise paramétrica para verificar quais são os efeitos de se variar o comprimento e a largura de uma antena de microfita com *patch* retangular.

Os resultados simulados mostram que alterar as dimensões da antena de referência compromete o casamento de impedância, aumentando a Perda de Retorno. Para contornar tal problema, para cada variação deve-se ajustar o tamanho das cavidades. Verificou-se que ao aumentar a largura do *patch* a um deslocamento da frequência de ressonância para valores menores. Ao passo em que a largura do *patch* é aumentado, verificou-se um aumento da largura de feixe do diagrama de radiação no plano  $E$ , enquanto a largura de feixe no plano  $H$  é diminuída. A variação do comprimento da antena produz efeitos graves, pois a antena passa a não ressoar na faixa analisada, com exceção da antena com o dobro do *patch* de referência, que ressoa próximo a frequência da antena de referência, mas com diagrama de radiação diretivo ao longo da antena, e não perpendicular como era esperado.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e a Fundação Amazônia Paraense de Amparo à Pesquisa (FAPESPA) pelos financiamentos deste projeto de pesquisa, e a contribuição dos colaboradores do Laboratório de Eletromagnetismo Aplicado (LEMAG) do Campus Universitário de Tucuruí da UFPA.

## REFERÊNCIAS

- [1] "IEEE Standard Definitions of Terms for Antennas," in IEEE No 145-1973 , vol., no., pp.1-18, 2 Aug. 1973.
- [2] SADIKU, Matthew NO. Elements of electromagnetics. 2015.
- [3] PEREIRA, Thomas Tadeu de Oliveira. Estudo e desenvolvimento de antena de microfita aplicada à veículos aéreos não tripulados para inspeção em linhas de transmissão. 2018.
- [4] BRITO FILHO, Francisco de Assis. Circuitos integrados para detecção de ondas submilimétricas em sistemas de identificação por imagem. 2015. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.
- [5] FUSCO, Vincent F. Teoria e técnicas de antenas: princípios e prática. Bookman Editora, 2009.
- [6] BALANIS, Constantine A. Antenna theory: analysis and design. John wiley & sons, 2016.
- [7] SILVA NETO, Almir Souza. Antenas de microfita para 4G, 5G e arranjo de antenas cilíndricas. 2016.
- [8] FERREIRA, Matheus Alves. Antena de microfita de alto ganho e polarização dupla para operação em redes celulares 5G. 2023.
- [9] BARROS, Tales. Antenas de Microfita Fractais Quadrangulares para Aplicação em Comunicações Sem Fio. 2020. Dissertação de Mestrado.
- [10] LAVOR, Otávio Paulino. Bi anisotropia em antenas de microfita retangular e estruturas circulares modificadas. 2015.
- [11] MATIN, M. A.; SAYEED, A. I. A design rule for inset-fed rectangular microstrip patch antenna. WSEAS Transactions on Communications, v. 9, n. 1, p. 63-72, 2010.
- [12] RACHMANSYAH, Antonius Irianto; MUTIARA, A. Benny. Designing and manufacturing microstrip antenna for wireless communication at 2.4 GHz. International Journal of Computer and Electrical Engineering, v. 3, n. 5, p. 670-675, 2011.
- [13] Ansys. High Frequency Structure Simulation Software. Disponível: <https://www.ansys.com/products/electronics/ansys-hfss>

## **ANEXO B – FABRICAÇÃO DE ANTENA *PATCH* POR MÉTODOS DE CORROSÃO E USINAGEM E CARACTERIZAÇÃO COM O LITEVNA-64**

Na próxima página encontra-se o arquivo original do artigo intitulado Fabricação de antena *patch* por métodos de corrosão e usinagem e caracterização com o LiteVNA-64, apresentado no XLII Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais – SBR, realizado em Belém-PA, no ano de 2024.

# Fabricação de antena *patch* por métodos de corrosão e usinagem e caracterização com o LiteVNA-64

Ryan Sousa, Leonardo Cruz, Rafael Bayma, Andrécia Costa e André Cruz

**Resumo**— Este trabalho apresenta a fabricação de duas antenas de microfitas com *patch* retangular para operação em 2,4 GHz. A primeira antena foi fabricada utilizando uma microfresadora CNC e a segunda, pelo método de corrosão com perclorato de ferro, em que a proteção do *patch* foi realizada com vinil adesivo. A perda de retorno e a VSWR das antenas foram medidas utilizando um LiteVNA-64 portátil. Os resultados experimentais foram comparados com os de uma antena simulada no *software* Ansys HFSS.

**Palavras-Chave**— Fabricação digital, Antena de microfita, LiteVNA-64 portátil.

**Abstract**— This work presents the manufacturing of two microstrip antennas with rectangular patches for operation at 2.4 GHz. The first antenna was manufactured using a CNC milling machine, while the second one was made with ferric chloride etching method, in which the patch protection was carried out by adhesive vinyl. The return loss and VSWR were measured using a portable LiteVNA-64. The experimental results were compared with simulations on Ansys HFSS.

**Keywords**— Digital fabrication, Microstrip Antenna, portable LiteVNA-64.

## I. INTRODUÇÃO

Uma antena de microfita consiste em uma fina plaqueta (*patch*) de metal separada de um plano de terra por um material dielétrico. Elas são ideais para aplicações que exigem um perfil planar por motivos aerodinâmicos. Além disso, elas são uma opção econômica, pois podem ser fabricadas como placas de circuito impresso [1] utilizando métodos de manufatura ou fabricação digital. Dentre os diversos métodos de manufatura aditiva ou subtrativa, destacam-se a fotolitografia, impressão por tinta condutora, usinagem CNC (Controle Numérico Computadorizado) e gravação a laser [2].

Neste trabalho, são apresentados dois processos de fabricação utilizados para a confecção de antenas de microfita em laboratórios acadêmicos. A caracterização e medição das antenas foram feitas utilizando um analisador de rede vetorial portátil LiteVNA-64 [3]. A escolha do instrumento de medição foi feita por se tratar de um equipamento de baixo custo, e possibilitar a execução de ensaios práticos mesmo na ausência de equipamentos de bancada. A primeira antena foi fabricada pelo método de usinagem CNC, e apresentou perda de retorno de  $-29,32$  dB em  $f_r = 2,31$  GHz, com impedância de entrada de  $Z_{ent} = 46,79 - j0,8 \Omega$ . A segunda antena, fabricada

pelo método de corrosão, apresentou perda de retorno de  $-25,41$  dB em  $f_r = 2,30$  GHz e impedância de entrada de  $Z_{ent} = 45 + j2,68 \Omega$ . Os resultados foram comparados com uma simulação realizada no *software* Ansys HFSS.

## II. PROJETO DA ANTENA *Patch* RETANGULAR

A antena de microfita *patch* retangular é mostrada na Fig. 1 em vista superior, e vista lateral.

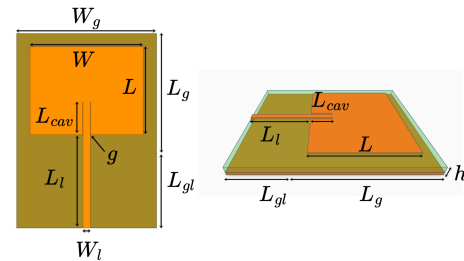


Fig. 1: Modelo da antena de microfita *patch* retangular: (a) Vista frontal; (b) Vista lateral.

As dimensões da antena *patch* retangular podem ser calculadas utilizando os procedimentos de projeto definidos em [4] e [5]. Objetivando a operação na frequência 2,4 GHz, utilizando um substrato de FR4 com constante dielétrica  $\epsilon_r = 4,4$ , espessura  $h = 1,5$  mm e tangente de perda de 0,02, obtêm-se as dimensões do *patch* da antena:  $W = 38,03$  mm e  $L = 29,47$  mm. As dimensões do plano de terra abaixo do *patch* são calculados utilizando:  $W_g = W + 6h = 47,03$  mm e  $L_g = L + 6h = 38,47$  mm. A antena é alimentada por uma linha de microfita indentada (*inset-fed*) com dimensões:  $W_l = 2,37$  mm e  $L_l = 31,25$  mm, sobre uma porção do plano de terra com comprimento  $L_{gl} = 26,75$  mm. Na entrada do *patch* são inseridas as cavidades com dimensões:  $g = 0,203$  mm e  $L_{cav} = 10,93$  mm.

## III. FABRICAÇÃO DIGITAL

A primeira etapa no processo de fabricação das antenas é obter um desenho digital da geometria no formato vetorizado SVG (*Scalable Vector Graphic*). Para isso, é necessário exportar o projeto simulado no *software* HFSS como uma imagem PNG (*Portable Network Graphic*), pois a versão estudantil não permite a exportação direta no formato desejado. Em seguida, utiliza-se o *software* Inkscape para vetorização do desenho. A partir do arquivo vetorizado, pode-se realizar a fabricação pelos métodos de usinagem, que utiliza uma fresadora CNC, ou corrosão por perclorato de ferro.

Ryan Sousa<sup>1</sup>, e-mail: ryan.sousa@tucurui.ufpa.br; Leonardo Cruz<sup>1</sup>, e-mail: francaleo062@gmail.com; Rafael Bayma<sup>2</sup>, e-mail: rafaelbayma@ufpa.br; Andrécia Costa<sup>2</sup>, e-mail: andreciacosta@ufpa.br; André Cruz<sup>2</sup>, e-mail: andcruz@ufpa.br. <sup>1</sup>Curso de Engenharia Elétrica, <sup>2</sup>Faculdade de Engenharia Elétrica; <sup>1,2</sup> Universidade Federal do Pará. Este trabalho foi parcialmente financiado por FAPESPA (projeto PRO06432-2023).

### A. Antena 1 - Método de Usinagem

A primeira antena foi fabricada com usinagem convencional, usando uma fresadora CNC. Inicia-se o processo importando o arquivo vetorizado no *software* de manufatura *Vetric Aspire*. São criadas duas operações: uma do tipo “preenchimento”, utilizada para remover a camada de cobre principal (com uma fresa de topo reto de 3 mm de diâmetro) e criação das fendas (fresa V-bit 30°, 0,3 mm); e uma operação de corte de borda, para destacar a antena da peça principal (*stock*). A primeira operação é programada para uma descida total de 0,32 mm e velocidade de deslocamento (*feed*) de 40 mm/min. Já a última é feita com a mesma velocidade, mas com uma descida total de 1,6 mm.

Os comandos de máquina (*G-code*) são gerados separadamente, um para cada percurso, pois a troca de fresa é feita manualmente. Após este processo, é realizada a solda do conector SMA (*SubMiniature version A*). As dimensões da antena fabricada pelo método de usinagem, na Fig. 2 (a), foram: para o *patch*  $W = 38,6$  mm e  $L = 30,1$  mm; para o *ground*  $W_g = 45,3$  mm e  $L_g + L_{gl} = 63,6$  mm; para a linha de microfita  $W_l = 2,4$  mm e  $L_l = 29,9$  mm; e para a cavidade  $g = 0,5$  mm e  $L_{cav} = 10,9$  mm.

### B. Antena 2 - Método de Corrosão

A segunda antena foi fabricada por corrosão com Perclorato de Ferro. O desenho é transferido para o fenolite com vinil adesivo, cortado com um *router* CNC a laser com precisão de 0,01 cm, usando um laser de CO<sub>2</sub> com potência de 80 W, foi utilizado 8% da capacidade para um corte superficial. A solução corrosiva é diluída na proporção de uma parte de perclorato para quatro partes de água. Após a corrosão, a placa é lavada e o conector SMA é soldado. As dimensões da antena fabricada, mostrada na Fig. 2 (b), são: *patch*  $W = 37,9$  mm e  $L = 29,3$  mm; *ground*  $W_g = 47,1$  mm e  $L_g + L_{gl} = 64,5$  mm; linha de microfita  $W_l = 2,3$  mm e  $L_l = 31,4$  mm; e cavidade  $g = 0,2$  mm e  $L_{cav} = 10,8$  mm.

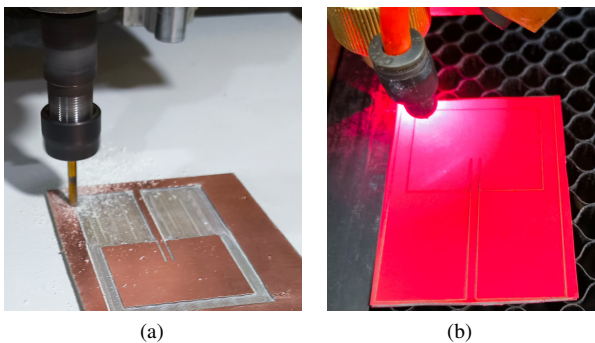


Fig. 2: Processos de fabricação das antenas *patch* retangular: (a) Método de usinagem em fresadora CNC; (b) Método de corrosão com preparo do negativo de proteção em CNC laser.

## IV. RESULTADOS

A Fig. 3 (a) mostra as antenas fabricadas em ambos os métodos de manufatura, enquanto na Fig. 3 (b) é mostrado o *setup* de medição das antenas utilizando o LiteVNA-64.

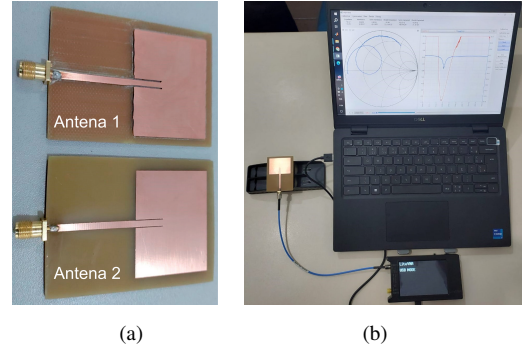


Fig. 3: (a) Antenas fabricadas; (b) *Setup* de medição.

Na Fig. 4 são mostradas a perda de retorno e a VSWR medidos no analisador de rede vetorial LiteVNA-64, em comparação aos resultados da antena simulada no HFSS.

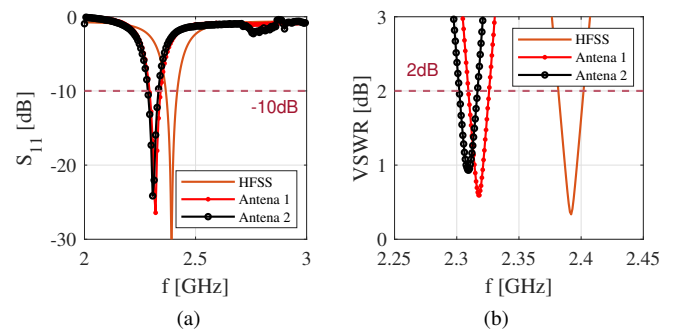


Fig. 4: Resposta das antenas: (a) Perda de retorno; (b) VSWR.

A antena 1 (fabricada pelo método de usinagem) apresentou frequência de ressonância  $f_r = 2,31$  GHz (3,08% de erro comparada a simulada no HFSS), com perda de retorno de  $-29,32$  dB, VSWR de 0,59 dB (bem abaixo de 2 dB) e largura de banda  $BW = 50$  MHz. A antena 2 (fabricada pelo método de corrosão) apresentou frequência de ressonância  $f_r = 2,30$  GHz (3,44% de erro), com perda de retorno de  $-25,41$  dB, VSWR de 0,93 dB e  $BW = 47,36$  MHz. As antenas 1 e 2 apresentam dimensões diferentes devido aos distintos processos de fabricação utilizados em cada uma e à precisão associada a esses processos.

## V. CONCLUSÕES

Os resultados apresentados mostram a viabilidade dos procedimentos de fabricação digital de antenas de microfita utilizando métodos didáticos dentro de laboratórios acadêmicos.

## REFERÊNCIAS

- [1] V. F. Fusco, Teoria e técnicas de antenas: princípios e prática. Bookman Editora, 2009.
- [2] L. A. R. Werlang, N. A. Carvalho, T. M. Abreu e U. M. Bruscatto, "Modelagem virtual e processos de fabricação digital como recursos no desenvolvimento de produtos", *Marcavistual*, v. 2, p. 395-411, 2018.
- [3] NANORFE. NanoVNA V2 Software. Disponível em: <https://nanorfe.com/nanovna-v2-software.html>. Acesso em: 7 ago. 2024.
- [4] C. A. Balanis, *Antenna theory: analysis and design*. John & sons, 2016.
- [5] O. P. Lavor, "Bi anisotropia em antenas de microfita retangular e estruturas circulares modificadas", Univ. Fed. Rio Gd. Norte, 2015. Consult. 2024-08-03. [Online]. Disponível: <http://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/20678>.