



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

CASCIO BATISTA DA COSTA

**CARACTERIZAÇÃO NUMÉRICA E EXPERIMENTAL DE UMA ANTENA DE  
MICROFITA RETANGULAR COM FENDAS BASEADA NA GEOMETRIA DE  
HALTERES**

TUCURUÍ - PA  
2023

CASCIO BATISTA DA COSTA

**CARACTERIZAÇÃO NUMÉRICA E EXPERIMENTAL DE UMA ANTENA DE  
MICROFITA RETANGULAR COM FENDAS BASEADA NA GEOMETRIA DE  
HALTERES**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia Elétrica, do Campus Universitário de Tucuruí, da Universidade Federal do Pará, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientadora: Profa. Dra. Andrécia Pereira da Costa - UFPA

TUCURUÍ - PA  
2023

**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)**

---

C837c Costa, Cascio Batista da.  
CARACTERIZAÇÃO NUMÉRICA E EXPERIMENTAL DE  
UMA ANTENA DE MICROFITA RETANGULAR COM  
FENDAS BASEADA NA GEOMETRIA DE HALTERES / Cascio  
Batista da Costa. — 2023.  
79 f. : il. color.

Orientador(a): Prof<sup>ª</sup>. Dra. Andrécia Pereira da Costa  
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade  
Federal do Pará, Campus Universitário de Tucuruí, Faculdade de  
Engenharia Elétrica, Tucuruí, 2023.

1. Antenas de microfita, HFSS, Fendas, Geometria de  
halteres, LiteVNA-64.. I. Título.

CDD 621.3

---

CASCIO BATISTA DA COSTA


**CARACTERIZAÇÃO NUMÉRICA E EXPERIMENTAL DE UMA ANTENA DE  
MICROFITA RETANGULAR COM FENDAS BASEADA NA GEOMETRIA DE  
HALTERES**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia Elétrica, do Campus Universitário de Tucuruí, da Universidade Federal do Pará, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Data de aprovação: 23/11/2023

Conceito: Excelente


**BANCA EXAMINADORA**

Documento assinado digitalmente  
 **ANDRÉCIA PEREIRA DA COSTA**  
Data: 23/11/2023 19:29:06-0300  
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

---

Orientador (a)


Dra. Andrécia Pereira da Costa – UFPA

Documento assinado digitalmente  
 **WASHINGTON CESAR BRAGA DE SOUSA**  
Data: 30/01/2024 10:32:47-0300  
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

---

Examinador (a) interno


Dr. Washington César Braga de Sousa – UFPA

Documento assinado digitalmente  
 **ALFREDO GOMES NETO**  
Data: 23/11/2023 22:57:58-0300  
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

---

Examinador (a) externo

Dr. Alfrêdo Gomes Neto – IFPB

Documento assinado digitalmente  
 **JULIETE DA SILVA SOUZA**  
Data: 23/11/2023 20:24:57-0300  
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

---

Examinador (a) externo

Ma. Juliete da Silva Souza – UFCG

Dedico esse trabalho de conclusão de curso a Deus por tudo que tens feito em minha vida, por ter sido minha maior força nos momentos mais difíceis. Por ter me guiado até aqui debaixo de suas asas, ter me guardado, com grandes bênçãos para minha vida e minha família.

## AGRADECIMENTOS

Antes de qualquer coisa, expresso minha profunda gratidão a Deus pela sua infinita misericórdia para comigo, por ter me guiado em todos os momentos e por sempre está comigo, sem Ele nada seria possível. Posso afirmar que até aqui, grandemente me ajudou o Senhor.

A minha família por todo apoio e confiança, sendo minha base na vida. Agradeço em especial, aos meus avós, João e Zenir, pelo amor, educação e por fazerem o papel de pai e mãe na minha criação, por suas orações e tamanho apoio para comigo. Aos meus irmãos Tália e Bruno pelo carinho e companheirismo. A meus tios e tias, Walison, Darsania, Sergio e Darlene por todo apoio, consideração, confiança e admiração. Aos meus primos Ryan, Paulo Sergio, Talysson, Warley Gabriel e José Armando, por grande companheirismo e união. À minha namorada Luana Priore, expresso minha gratidão pelo companheirismo, amor, carinho e por sempre ter me apoiado, estando comigo nos momentos que mais precisei, sendo minha base quando a distância da família apertava e em todos os momentos.

Aos meus pais, Jair (*in memoriam*) e Rosilene (*in memoriam*) os quais são responsáveis pela minha existência, a saudade nunca deixou de existir e sempre serão lembrados por mim até os últimos dias da minha vida, tenho certeza que estariam felizes e orgulhosos de tamanha e importante conquista. Com muito amor e emoção agradeço a Deus pelo tempo de vida que lhes concedeu e pela dádiva de tê-los como pais.

A minha orientadora, Andrécia, por seus ensinamentos, atenção, disponibilidade e por ser tão prestativa. Agradeço por ter aceitado me orientar mesmo estando no seu período de licença, do pouco tempo que a conheço desde a primeira aula é perceptível seu esforço e dedicação como professora. Por ter me auxiliado em todo o processo deste trabalho, desde o fornecimento do material a ser utilizado até os ensinamentos práticos e teóricos. Por ter ido junto com seu filho ao laboratório me auxiliar nas medições experimentais, não medindo esforços para o progresso deste trabalho.

As amigas que construí durante esses cinco anos de graduação, agradeço a toda minha turma com quem compartilhei esse longo período. Em especial agradeço aos meus amigos: Edson Davi, Victor Gaspar, Matheus Gama, André Aranha, Dário Panágio, Gilzi Rodrigues, Daniel Avis e Francisco Felix. Dentre esses destaco o Matheus Gama e André Aranha, pela amizade e companheirismo nos estudos que fizemos juntos, formamos uma equipe unida, a partir dessa equipe que aprendi o que é trabalho colaborativo. Amizades estas que levarei para vida e que sem dúvida contribuíram de alguma forma com minha formação durante o período acadêmico.

Aos membros e professores da banca examinadora, Washington Cesar, Alfrêdo Gomes e Juliete da Silva, agradeço por aceitarem o convite, é uma honra tê-los como avaliadores.

A todo corpo de docente de professores da UFPA campus de Tucuruí-PA. Aos professores que durante esses cinco anos tive o prazer de assistir suas aulas e aprender e me desenvolver cada vez mais, estes são responsáveis por plantar a semente do conhecimento e da busca por aprendizado.

A todos, meus mais sinceros agradecimentos!

*“Talvez não tenha conseguido fazer o melhor, mas lutei para que o melhor fosse feito. Não sou o que deveria ser, mas Graças a Deus, não sou o que era antes. ” (Martin Luther King)*

## RESUMO

Este trabalho apresenta a caracterização numérica e experimental de uma antena de microfita retangular com fendas com base na geometria do tipo halteres (equipamento utilizado em exercício de musculação). A investigação e análise deste estudo consistiram na avaliação dos parâmetros de antenas de microfita, bem como na observação de seu desempenho e características à medida que fendas em forma de halteres eram introduzidas ao elemento irradiante, alterando assim a geometria da antena. Essa análise deste trabalho contempla de forma sucinta três cenários: antena sem fenda, antena com uma fenda e antena com duas fendas. Como ferramenta de projeto para análise dos cenários da antena a medida que fendas eram introduzidas em sua geometria, empregou-se o *software* HFSS, que permitiu o estudo dos parâmetros da antena à medida que sua forma geométrica foi modificada. Os dados experimentais da antena construída foram coletados com o auxílio de um dispositivo de baixo custo, o analisador de rede vetorial portátil LiteVNA-64. Dispositivo este que, visa facilitar medições e análises de antenas, destacando-se por sua abordagem acessível em termos de custo-benefício. Os principais parâmetros analisados demonstraram que a introdução de fendas em formato de halteres no elemento irradiante da antena resultou em desempenho satisfatório, tanto nos resultados simulados quanto nos medidos. Além disso, a adição de fendas no formato de halteres contribuiu para o surgimento de uma nova frequência de operação da antena, permitindo a antena operar a frequência de 2,06 GHz e 2,4 GHz, com um ganho de 5,665 dBi e 6,912 dBi, respectivamente. Este resultado torna a antena adequada para aplicações de WI-FI e outras tecnologias dentro da faixa de frequência correspondente. Essa característica se revela essencial, especialmente ao considerar a busca pela operação eficiente de antenas em dupla faixas de frequência (dual band).

**Palavras chave:** Antenas de microfita, HFSS, Fendas, Geometria de halteres, LiteVNA-64.

## ABSTRACT

This work presents the numerical and experimental characterization of a rectangular microstrip antenna with halter-shaped slots, inspired by the design of weightlifting equipment. The investigation and analysis in this study involved evaluating the parameters of microstrip antennas, as well as observing their performance and characteristics as halter-shaped slots were introduced to the radiating element, thereby altering the antenna's geometry. This analysis succinctly covers three scenarios: an antenna without slots, an antenna with one slot, and an antenna with two slots. As a design tool for analyzing antenna scenarios with the introduction of slots in its geometry, the HFSS software was employed. This software facilitated the study of antenna parameters as its geometric shape was modified. The experimental data of the constructed antenna were collected with the assistance of a low-cost device, the portable vector network analyzer LiteVNA-64. This device aims to simplify antenna measurements and analyses, standing out for its cost-effective approach. The key parameters analyzed demonstrated that the introduction of halter-shaped slots in the radiating element of the antenna resulted in satisfactory performance, both in simulated and measured results. Furthermore, the addition of halter-shaped slots contributed to the emergence of a new operating frequency for the antenna, enabling it to operate at 2,06 GHz and 2,4 GHz, with gains of 5,665 dBi and 6,912 dBi, respectively. This outcome renders the antenna suitable for WI-FI applications and other technologies within the corresponding frequency range. This characteristic proves essential, particularly when considering the pursuit of efficient operation for antennas in dual-frequency bands.

**Keywords:** Microstrip Antennas, HFSS, Slots, Halteres Geometry, LiteVNA-64.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 – Representação de antena dipolo .....	23
Figura 2.2 – a) Antena com refletor parabólico; b) Antena Sat .....	24
Figura 2.3 – a) Antena corneta piramidal; b) Antena cônica; b) Antena retangular .....	25
Figura 2.4 – Representação de antena Yagi-Uda junto ao diagrama de radiação .....	26
Figura 2.5 – Diagrama de radiação em um sistema esférico de coordenadas .....	32
Figura 2.6 – Diagrama de radiação com a presença de lóbulos .....	33
Figura 2.7 – Onda eletromagnética - campo elétrico E e densidade de fluxo magnético B oscilando em fase no vácuo .....	34
Figura 3.1 – Antena de microfita.....	36
Figura 3.2 – Formas da geometria do <i>patch</i> de uma antena de microfita.....	37
Figura 3.3 – Diagramas de radiação em função do plano terra: a) Arranjo <i>broadside</i> ; (b) Arranjo <i>end-fire</i> .....	39
Figura 3.4 – Alimentação por linha de microfita.....	40
Figura 3.5 – Alimentação por meio de cabo coaxial .....	41
Figura 3.6 – Alimentação acoplamento por abertura .....	42
Figura 3.7 – Alimentação acoplamento por proximidade .....	42
Figura 4.1 – Antena de microfita retangular.....	45
Figura 4.2 – Simulação: a) Vista frontal antena sem fendas; b) Vista isométrica 3D antena sem fendas; c) Vista inferior (plano terra) antena sem fendas .....	49
Figura 4.3 – Modelo de halteres equipamento utilizado em exercícios de musculação.....	50
Figura 4.4 – a) Antena sem fendas no <i>patch</i> ; b) Antena com uma fenda em forma de halteres adicionada ao <i>patch</i> ; c) Antena com duas fendas em forma de halteres adicionada ao <i>patch</i> . .....	51
Figura 4.5 – Antena a ser fabricada com duas fendas em forma de halteres adicionada ao <i>patch</i> . .....	51
Figura 4.6 – a) Vista frontal antena fabricada com duas fendas em forma de halteres; b) Vista frontal antena fabricada com duas fendas em forma de halteres comparada com uma moeda; c) Vista inferior (plano de terra) antena fabricada.....	52
Figura 5.1 – Comparação da simulação $S_{11}$ entre antenas sem fendas, com uma fenda e com duas fendas. ....	53
Figura 5.2 – Comparação simulação VSWR entre antenas sem fendas, com uma fenda e com duas fendas .....	55

Figura 5.3 – Simulação dos diagramas de radiação, plano E e plano H: (a) Antena sem fendas 2,45 GHz; (b) Antena com uma fenda 2,45 GHz; (c) Antena com uma fenda 2,7 GHz; (d) Antena com duas fendas 2,05 GHz; (e) Antena com duas fendas 2,4 GHz .....	55
Figura 5.4 – a) Simulação do ganho diretivo 3D: (a) Antena sem fendas 2,45 GHz; (b) Antena com uma fenda 2,45 GHz; (c) Antena com uma fenda 2,7 GHz; (d) Antena com duas fendas 2,05 GHz; (e) Antena com duas fendas 2,4 GHz .....	57
Figura 5.5 – Simulação da Carta de Smith: (a) Antena sem fendas; (b) Antena com uma fenda; (c) Antena com duas fendas.....	58
Figura 5.6 – a) Vista superior do LiteVNA-64; b) Vista inferior do LiteVNA-64 .....	60
Figura 5.7 – <i>Setup</i> de configuração utilizado para medição da antena.....	61
Figura 5.8 – Configuração real para medição da antena .....	61
Figura 5.9 – Comparativo entre os valores simulados e medidos para o $S_{11}$ .....	62
Figura 5.10 – Comparativo entre os valores simulados e medidos para o VSWR.....	63
Figura 5.11 – Representação da Carta de Smith (impedância sem normalização) medida experimentalmente.....	64

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1– Definição e exemplos de polarização .....	34
Tabela 2 – Materiais dielétrico e suas características.....	38
Tabela 3 – Comparação do desempenho da antena com fendas proposto com outros publicados na literatura.....	44
Tabela 4 – Especificações de projeto da antena de microfita retangular.....	46
Tabela 5 – Medidas e dimensões da antena de microfita retangular.....	48
Tabela 6 – Dimensões e medidas completa da antena com duas fendas.....	52
Tabela 7 – Valores simulados e medidos para o $S_{11}$ .....	63
Tabela 8 – Valores simulados e medidos para o VSWR.....	64

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

<i>ANSOFT</i>	Desenvolvedor de <i>software</i> de análise eletromagnética
BW	<i>Bandwidth</i> (largura de banda)
FR4	Substrato dielétrico a base de fibra de vidro e resina de epóxi
FEM	Método numérico dos elementos finitos
GPS	Sistemas de posicionamento global
HFSS	<i>High Frequency Structure Simulator</i>
LITEVNA-64	Analizador de rede vetorial
MoM	<i>Method of Moments</i> (Método dos Momentos)
PTFE	Poli-tetra-flúor-etileno (Teflon)
UFPA	Universidade Federal do Pará
VNA	<i>Vector Network Analyzer</i>
VSWR	<i>Voltage standing wave ratio</i> (coeficiente de onda estacionária)
WI-FI	<i>Wireless Fidelity</i> (Tecnologia de conexão sem fio)

## LISTA DE SÍMBOLOS

$B$	Densidade de fluxo magnético
$c$	Velocidade da luz no espaço livre
$D$	Diretividade
$dB$	Decibel - Medida relativa entre dois níveis de potência
$\epsilon_r$	Permissividade relativa do material
$\epsilon_0$	Permissividade elétrica do vácuo
$\epsilon_{\text{reff}}$	Permissividade elétrica relativa efetiva do dielétrico
$e_0$	Eficiência total
$e_r$	Eficiência de reflexão
$e_c$	Eficiência condutiva
$e_d$	Eficiência dielétrica
$f$	Frequência em Hertz
$f_0$	Frequência central, que a antena foi feita para operar
$f_1$	Frequência inferior do limite da banda de frequência de operação da antena
$f_2$	Frequência superior do limite da banda de frequência de operação da antena
GHz	Gigahertz
$G$	Ganho da antena em decibéis isotrópicos
$h$	Espessura do substrato dielétrico
$I$	Corrente elétrica
$j$	Unidade imaginária
$L_l$	Comprimento da fenda do halter
$L_s$	Comprimento do substrato
$L_p$	Comprimento do <i>patch</i>
$L_e$	Comprimento da borda do <i>patch</i> até a extremidade do substrato
$L_0$	Largura da fenda ( <i>gap</i> )
$L_f$	Comprimento da linha de microfita do <i>patch</i> até a extremidade do substrato
MHz	Megahertz
mm	Milímetro
$P_{\text{rad}}$	Potência radiada total
$P_{\text{in}}$	Potência de entrada
$R$	Parte resistiva

$r$	Raio da ponta circular do halter
$S_{11}$	Coefficiente de reflexão
$U$	Intensidade de radiação
$U_0$	Intensidade de radiação de uma fonte isotrópica
$V_{\max}$	Tensão máxima na linha de transmissão
$V_{\min}$	Tensão mínima na linha de transmissão
$X$	Parte reativa
$W_p$	Largura do <i>patch</i> da antena
$W_f$	Largura da linha de microfita
$W_s$	Comprimento do <i>Patch</i> da antena
$W_m$	Largura da borda do <i>patch</i> até a extremidade do substrato
$W_1$	Largura da fenda dos halteres
$Y_0$	Comprimento da fenda ( <i>gap</i> )
$Z$	Impedância
$Z_0$	Impedância característica
$Z_{in}$	Impedância de entrada
$Z_A$	Impedância da antena
$\mu$	Permeabilidade magnética
$\mu_r$	Permeabilidade magnética relativa
$\lambda$	Comprimento de onda
$\tau$	Coefficiente de reflexão
$\delta$	Tangente de Perdas
%	Percentual
2D	Modelagem bidimensional
3D	Modelagem tridimensional
$\pi$	Pi (equivalente ao valor 3,1415)
$\Delta L$	Varição do comprimento do <i>patch</i> devido ao efeito de borda.

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>18</b>
1.1 Importância e contexto histórico .....	19
1.2 Objetivos .....	20
1.2.1 Objetivo geral.....	20
1.2.2 Objetivos específicos .....	20
1.3 Estrutura do trabalho .....	20
<b>2 ANTENAS .....</b>	<b>22</b>
2.1 Tipos de antenas .....	23
2.1.1 Antenas dipolo .....	23
2.1.2 Antenas parabólicas .....	24
2.1.3 Antenas de abertura.....	25
2.1.4 Antena Yagi-Uda .....	26
2.2 Conceitos e principais parâmetros de antenas .....	27
2.2.1 Eficiência.....	27
2.2.2 Diretividade.....	29
2.2.3 Ganho .....	30
2.2.4 Impedância de entrada.....	30
2.2.5 Diagrama de radiação.....	31
2.2.6 Polarização .....	33
2.2.7 Largura de banda.....	35
<b>3 ANTENAS DE MICROFITA .....</b>	<b>36</b>
3.1 <i>Patch</i> .....	37
3.2 Substrato.....	37
3.3 Plano terra.....	39
3.4 Técnicas de alimentação.....	39
3.4.1 Alimentação através de uma linha de microfita.....	40
3.4.2 Alimentação por meio de cabo coaxial (ponta de prova).....	41

3.4.3 Acoplamento por abertura.....	41
3.4.4 Acoplamento por proximidade.....	42
3.5 Vantagens e desvantagens .....	43
3.6 Estado da arte .....	44
<b>4 MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>45</b>
4.1 Projeto de uma antena de microfita.....	45
4.1.1 Especificações do projeto.....	46
4.1.2 Cálculos do projeto .....	46
4.1.3 Simulações da antena de microfita.....	48
4.1.4 Fabricação da antena de microfita.....	51
<b>5 RESULTADOS E DISCURSSÕES .....</b>	<b>53</b>
5.1 Simulações e análises .....	53
5.2 Medições utilizando o LiteVNA-64 .....	59
5.2.1 LiteVNA-64 .....	59
5.2.2 Resultados .....	61
<b>6 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>65</b>
6.1 Trabalhos futuros .....	66
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>67</b>
<b>APÊNDICE A – Guia de fabricação da antena de microfita.....</b>	<b>71</b>

# 1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, o avanço tecnológico no campo das comunicações tem desempenhado um papel essencial na transformação tecnológica da sociedade. A capacidade de transmitir e receber informações de maneira eficiente e confiável se tornou um elemento essencial na interconexão global, afetando áreas que vão desde a indústria, medicina até a educação e o entretenimento. Nesse cenário, a pesquisa e o desenvolvimento de tecnologias de antenas desempenham papel fundamental ao permitirem a comunicação e troca de dados por meio de ondas eletromagnéticas.

Antenas têm grande e significativa importância nos diversos sistemas de comunicação, sendo estas estruturas responsáveis por transmitir e receber energia eletromagnética através do espaço livre (BALANIS, 2005). Uma das áreas mais promissoras dentro do domínio de antenas é a tecnologia de antenas em microfita, também conhecida como antenas *patch*. Essa abordagem oferece um método altamente eficaz para projetar e fabricar antenas, combinando eficiência com um formato compacto, flexível e de baixo custo. (DA SILVEIRA, 2016).

Pesquisas e desenvolvimentos relacionados às antenas de microfita têm se intensificado nos últimos anos até os dias atuais, devido sua ampla gama de aplicações nos setores de telecomunicações. Entre os diversos segmentos em que encontram utilidade, destacam-se aplicações como, radares, comunicações via satélite, redes móveis, sistemas de mísseis, aeronaves, sistemas de posicionamento global (GPS), entre outras (ANDRADE, 2014).

O objetivo principal deste trabalho é analisar os parâmetros de uma antena em microfita retangular convencional cuja frequência de projeto é 2,45 GHz, e observar a variação de seus parâmetros conforme é feita a introdução de fendas ao elemento *patch* da antena. Estas fendas são aberturas estrategicamente projetadas na antena, têm o potencial de modificar os parâmetros e desempenho da antena de maneira significativa.

Para a análise, foram realizadas simulações computacionais com o *software High Frequency Structure Simulator (HFSS)* da *Ansoft*, (*software* comercial que simula estruturas em alta frequência). Com base na análise e resultados de simulação, procede-se a fabricação de uma antena em microfita utilizando a geometria contendo fendas. Os procedimentos de fabricação da antena são descritos em um apêndice. Por fim, a antena é caracterizada experimentalmente utilizando o dispositivo de medição portátil de baixo custo analisador vetorial LiteVNA-64.

## 1.1 Importância e contexto histórico

As antenas de microfita, cujas origens se deram nas pesquisas realizadas em diferentes partes do mundo durante a metade do século XX, desde o surgimento representam um marco significativo na evolução das tecnologias de comunicação e telecomunicações. Contribuições notáveis foram feitas por pioneiros como Deschamps nos Estados Unidos em 1953 e Gutton e Baissinot na França em 1955 (KUMAR; RAY, 2002). Esses avanços iniciais lançaram as bases para uma revolução nas telecomunicações, abrindo caminho para aplicações inovadoras.

Com o passar das décadas, à medida que a tecnologia de telecomunicações continuou a avançar, as antenas de microfita ganharam destaque, especialmente no contexto de sistemas de comunicação. Na década de 1970, pesquisadores visionários, como Howell e Munson, concretizaram a fabricação das primeiras antenas de microfita com aplicações práticas, marcando um ponto de virada na história dessa tecnologia (MORAIS, 2011). Essas antenas, inicialmente concebidas como soluções promissoras para sistemas de comunicação, logo se tornaram fundamentais em diversas áreas, desempenhando um papel de suma importância no desenvolvimento de tecnologias de ponta.

Desse modo, antenas de microfita têm suscitado um interesse em diversas áreas de telecomunicações, devido às suas vantagens em relação às antenas de micro-ondas tradicionais. Nesse contexto, tanto o mercado quanto os pesquisadores têm investido em projetos de antenas que possam atender com facilidade às crescentes demandas desses sistemas. Suas características incluem não apenas a facilidade de fabricação e custos reduzidos, mas também seu tamanho compacto e a notável facilidade de integração com circuitos integrados de micro-ondas, tornando-as ideais para aplicações em dispositivos móveis, comunicações via satélite, sistemas de posicionamento global (GPS) e uma variedade de tecnologias com e sem fio (ANDRADE, 2014).

Neste contexto, é fundamental compreender o papel que as antenas de microfita desempenham na evolução das comunicações modernas e nas tecnologias que moldam o nosso mundo interconectado. Este trabalho visa descrever as antenas de microfita, abordando diversos aspectos, incluindo seu projeto, funcionamento com base na sua geometria e suas aplicações. Além disso, busca fornecer *insights* valiosos sobre o processo do projeto de uma antena em microfita, abrangendo desde a fundamentação teórica, simulação computacional, análise, fabricação até a medição utilizando LiteVNA-64. Dessa forma, esse trabalho tem o objetivo de contribuir para o conhecimento de antenas de microfita em sua constante evolução.

## 1.2 Objetivos

Nesta seção, serão apresentados o objetivo geral e objetivos específicos que orientam a realização deste trabalho.

### 1.2.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho consiste em realizar um estudo sobre antenas *patch* em microfita, incluindo a análise de uma antena retangular operando a frequência de 2,45 GHz, a introdução de fendas para modificar sua geometria e verificar os parâmetros e desempenho da antena conforme cenários de mudança da sua forma geométrica.

### 1.2.2 Objetivos específicos

- Realizar um estudo dos principais parâmetros de antenas;
- Analisar e projetar uma antena de microfita retangular;
- Simular as antenas projetadas via *software* HFSS e verificar seu comportamento e parâmetros conforme é feito a introdução de fendas no *patch* da antena;
- Fabricar antena de microfita com fendas na geometria de halteres;
- Realizar medições dos parâmetros da antena utilizando o dispositivo portátil de baixo custo LiteVNA-64;
- Conduzir uma análise comparativa entre os resultados obtidos por medições e simulações computacionais.

## 1.3 Estrutura do trabalho

Este trabalho se estrutura em seis capítulos. No capítulo 1, delineou-se a introdução do estudo, onde foi apresentado a estrutura, objetivos e a relevância da pesquisa sobre antenas de microfita. Destacou-se a importância histórica dessas antenas e seu impacto na sociedade.

No capítulo 2, é apresentado a fundamentação teórica acerca de antenas, com o intuito de nortear o leitor sobre os avanços e importância de antenas nas tecnologias atuais. Examinou-se detalhadamente os parâmetros e características de antenas, incluindo tipos de antenas, seus principais conceitos, e características.

No capítulo 3, são mostrados os principais conceitos e parâmetros de antenas de microfita. Foi explorado o contexto histórico que moldou essas antenas, examinando a estrutura de antenas em microfita, os diversos tipos e técnicas de alimentação, bem como suas vantagens e desvantagens. Este capítulo proporciona uma visão das antenas de microfita, com foco nos

parâmetros que servirão de base para a compreensão ao longo do desenvolvimento do projeto de uma antena de microfita com fendas.

No capítulo 4, adentrou-se ao projeto que consiste este Trabalho de Conclusão de Curso, onde foi apresentado o projeto e especificações. Será exibido a geometria da antena a ser desenvolvida e analisada, e descrito os métodos e cálculos necessários para a elaboração de um projeto de uma antena de microfita. Utilizando o *software* HFSS da *Ansoft*, conduziu-se as simulações da antena de microfita inicialmente projetada, introduzindo fendas em sua estrutura geométrica, para observar como os parâmetros e o desempenho da antena se modificam à medida que sua forma geométrica é alterada.

No capítulo 5 é apresentado os resultados obtidos a partir da fabricação da antena com fendas. Foi realizada uma análise dos resultados do projeto, validando-os por meio da comparação e análise entre os dados simulados e medidos dos principais parâmetros das antenas. A medição foi feita utilizando o analisador vetorial portátil LiteVNA-64.

No capítulo 6 são abordadas as conclusões obtidas com o projeto. Neste capítulo avaliou-se se os objetivos estipulados foram alcançados e foi analisado se os resultados se mostraram satisfatórios.

## 2 ANTENAS

Desde o seu surgimento no século XIX, as antenas têm sido a chave na evolução da tecnologia de comunicação, moldando nossa forma de interagir com o mundo ao nosso redor. Antenas são dispositivos que possibilita a transferência de sinais de um meio guiado para ondas que se propagam no espaço livre, possibilitando sua recepção por outra antena. Da mesma forma, uma antena pode também detectar um sinal que se propaga no espaço livre e convertê-lo em uma forma de onda guiada (COSTA, 2009). O contexto histórico das antenas se desenrola em uma narrativa de progresso científico e inovação tecnológica.

As antenas tiveram sua origem com as experimentações pioneiras do físico alemão Heinrich Hertz no contexto da teoria de ondas eletromagnéticas proposta por James Clerk Maxwell. Hertz estava determinado a comprovar a existência de ondas eletromagnéticas, e para isso, projetou um dispositivo que poderia emitir e receber essas ondas. Inicialmente, esse dispositivo consistia em duas placas metálicas conectadas a hastes também metálicas. Essas hastes estavam interligadas a duas esferas, que eram mantidas a uma distância precisa entre si, distância essa cuidadosamente calculada para os propósitos de sua experiência. Quando Hertz conseguiu demonstrar experimentalmente a existência de ondas eletromagnéticas, essa unidade de frequência passou a ser denominada em sua homenagem de Hertz (Hz) (NASCIMENTO; SIMÕES, 2017).

Durante a Segunda Guerra Mundial, as antenas foram dispositivos essenciais para as comunicações militar e nas aplicações de radar, impulsionando ainda mais as pesquisas. Após a Segunda Guerra Mundial, a tecnologia das antenas continuou a evoluir rapidamente. O uso de tecnologias como satélites de comunicação, micro-ondas e comunicações móveis exigiu o desenvolvimento de antenas específicas para atender essas aplicações (SANTOS, 2016).

Hoje, as antenas estão presente em praticamente todos os sistemas de comunicação sem fio, desde a transmissão de sinais de TV e rádio até a conectividade de dispositivos móveis e a comunicação via satélite. Desse modo, à medida que a demanda por comunicações rápidas e confiáveis cresce exponencialmente, as antenas desempenham um papel vital na melhoria da eficiência da transmissão de dados, na expansão da cobertura de redes sem fio e no desenvolvimento de tecnologias emergentes, como a 5G. Essas inovações não apenas aceleram a conectividade global, mas também impulsionam o desenvolvimento de setores críticos, como IoT (Internet das Coisas) e veículos autônomos. Além disso, trabalhos nesta área, pesquisas e a inovação contínua de antenas não só aprimoram a qualidade das comunicações, mas também contribui para a redução de custos e a otimização de recursos, tornando as tecnologias de

comunicação mais acessíveis e eficazes para um público cada vez mais amplo (MORAIS, 2011).

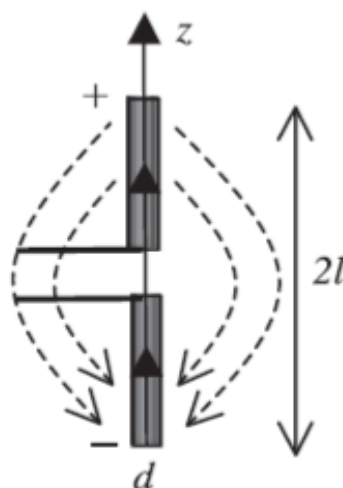
## 2.1 Tipos de antenas

Existe uma grande variedade de antenas, com diferentes tipos adequados para diferentes finalidades. Os tipos de antenas podem ser classificados de várias formas, incluindo sua geometria, princípio de funcionamento e aplicação. Algumas das categorias mais comuns de se encontrar são:

### 2.1.1 Antenas dipolo

Uma antena dipolo, frequentemente chamada de antena dipolo simples ou dipolo de meia onda, é um tipo de antena amplamente utilizado na comunicação de rádio, televisão, comunicações sem fio e outras aplicações. Ela é chamada de "dipolo" porque possui duas partes condutoras idênticas e simétricas que geralmente apresentam um comprimento total de aproximadamente meio comprimento de onda (NASCIMENTO; SIMÕES, 2017). A Figura 2.1 ilustra uma antena do tipo dipolo.

Figura 2.1 – Representação de antena dipolo



Fonte: Nascimento e Simões (2017)

As dimensões de uma antena dipolo é calculada utilizando a conhecida equação do comprimento de onda, mostrado na Equação (1).

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (1)$$

Em que,

$\lambda$  = Comprimento de onda corresponde à frequência de operação da antena, em metros

$C$  = Velocidade da luz no espaço livre, igual a  $3 \times 10^8$  m/s

$f$  = Frequência de operação da antena, em Hz

Essa forma de antena foi fundamental em experimentos pioneiros na área de estudos de ondas eletromagnéticas. Um dos exemplos mais notáveis é o experimento realizado por Heinrich Hertz, que utilizou uma antena dipolo em seu trabalho a fim de comprovar a existência das ondas eletromagnéticas no final do século XIX.

### 2.1.2 Antenas parabólicas

Antenas do tipo parabólicas são dispositivos que consistem em uma superfície refletora em forma de parabolóide, geralmente feita de metal, e uma antena receptora ou transmissora posicionada no foco da parábola. Essas antenas são amplamente usadas em comunicações por satélite, radares e telescópios, devido à sua capacidade de direcionar sinais de forma eficiente em uma direção específica (NASCIMENTO e SIMÕES, 2017).

A curvatura da superfície parabólica reflete as ondas eletromagnéticas em um ponto focal, permitindo comunicações de longa distância e aplicações que requerem alta direcionalidade e ganho, tornando-as cruciais em tecnologias que dependem da transmissão e recepção de sinais de micro-ondas e ondas milimétricas (BALANIS, 2005). A Figura 2.2 ilustra modelos de antenas parabólicas.

Figura 2.2 – a) Antena com refletor parabólico; b) Antena Sat



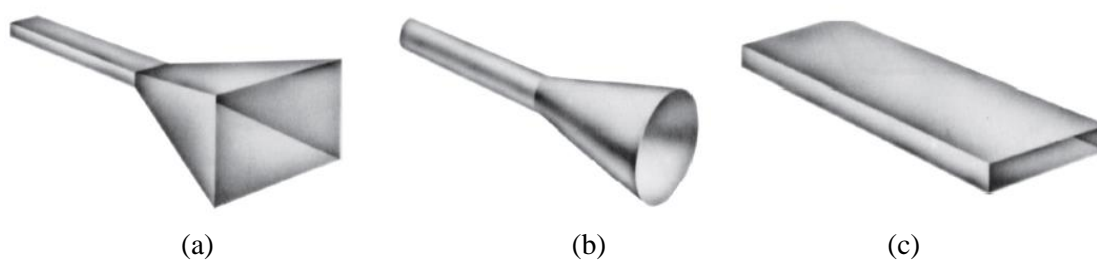
Fonte: Zapi (2023)

De modo geral, as antenas parabólicas são amplamente utilizadas em várias indústrias e em residências, operando desde a transmissão de sinais de televisão via satélite até pesquisas científicas do cosmo. Sua capacidade de focalizar sinais e direcioná-los com precisão permite a comunicação em distâncias intercontinentais e a exploração espacial. Além disso, seu uso se estende a aplicações práticas, como acesso à internet em áreas remotas e previsão meteorológica avançada (FEITOZA, 2005).

### 2.1.3 Antenas de abertura

As antenas de abertura, um tipo especializado de antena, são notáveis por sua estrutura que incorpora uma abertura em sua superfície radiante, distinguindo-se de antenas convencionais de superfície sólida. Essa abertura pode adotar uma variedade de formas, como guias de onda, cornetas ou outras configurações, que podem ser quadradas, retangulares, circulares ou elípticas, entre outras. Sua versatilidade e eficiência tornam essas antenas altamente relevantes, especialmente em aplicações aeronáuticas e espaciais, nas quais podem ser convenientemente instaladas na fuselagem de aeronaves ou naves espaciais (BALANIS, 2005). Na Figura 2.3 é ilustrado alguns dos principais modelos de antenas de abertura.

Figura 2.3 – a) Antena corneta piramidal; b) Antena cônica; b) Antena retangular



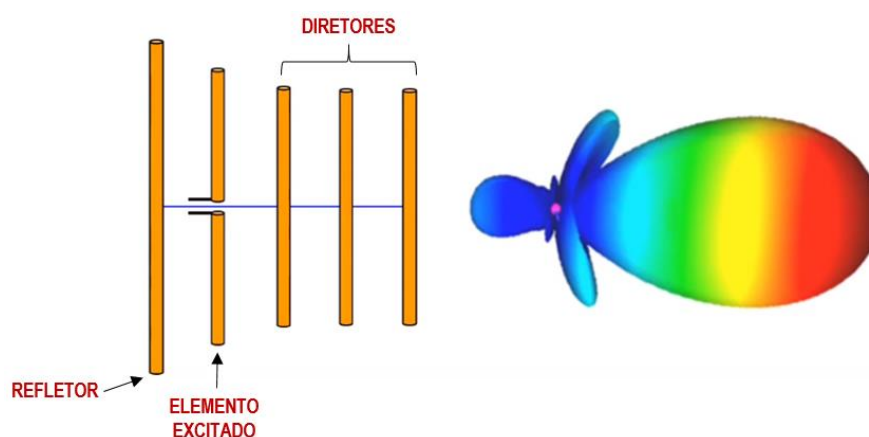
Fonte: Balanis (2005)

Além da flexibilidade de design, outro fator importante que contribui para a atratividade das antenas de abertura é a possibilidade de revestir a abertura com materiais dielétricos. Esse revestimento protege a antena das condições ambientais adversas, garantindo durabilidade e desempenho em situações desafiadoras, como variações climáticas extremas ou exposição a ambientes hostis. A capacidade de suportar essas condições torna as antenas de abertura uma escolha prática e confiável em aplicações espaciais e aeronáuticas, onde a robustez é essencial (NASCIMENTO; SIMÕES, 2017).

### 2.1.4 Antena Yagi-Uda

A antena Yagi-Uda, muitas vezes simplesmente chamada de antena Yagi, é um tipo popular de antena direcional utilizada em comunicações de rádio e televisão, bem como em redes de comunicação sem fio, como Wi-Fi. Foi desenvolvida por dois engenheiros japoneses, Hidetsugu Yagi e Shintaro Uda, na década de 1920, e se tornou uma das antenas direcionais mais usadas devido à sua simplicidade e eficácia (PANCRACIO, 2019).

Figura 2.4 – Representação de antena Yagi-Uda junto ao diagrama de radiação



Fonte: Walter (2020)

Segundo Walter (2020), a antena Yagi-Uda consiste em vários elementos, conforme ilustra a Figura 2.4, sendo os principais:

**Elemento Alimentador (*Driven Element*):** É o elemento excitado central da antena, geralmente conectado à fonte de sinal. Esse é o elemento responsável pela radiação e captação das ondas eletromagnéticas.

**Refletor:** O refletor é um elemento atrás do elemento excitado que atua refletindo as ondas eletromagnéticas em direção ao elemento excitado, aumentando assim o ganho da antena na direção desejada.

**Diretores:** Os diretores são elementos colocados na frente do elemento excitado e, em número variável, aumentam ainda mais o ganho da antena com o objetivo de direcionar o sinal com maior intensidade para direção em que estão apontados.

A geometria e o espaçamento desses elementos são fundamentais para o desempenho da antena Yagi-Uda. A distância entre os elementos e seu comprimento são projetados para corresponder à frequência de operação da antena. Quando uma onda eletromagnética incide na antena, os elementos trabalham juntos para concentrar a energia em uma direção específica,

tornando a antena direcional. Isso resulta em maior alcance e capacidade de focar em uma fonte de sinal específica (PANCRACIO, 2019).

Esse tipo de antena é amplamente utilizado até os dias atuais em sistemas de recepção de televisão, transmissão de rádio, redes Wi-Fi de longo alcance, sistemas de radar, comunicações de rádio amador e outros. Sua capacidade de direcionar o sinal e seu ganho considerável a tornam uma escolha a se considerar em muitos cenários.

É importante ressaltar que, embora a antena Yagi-Uda seja altamente direcional, sua desvantagem é a estreita largura de banda, o que significa que ela é mais eficaz em uma faixa de frequência específica. Portanto, o projeto e a sintonização adequados são essenciais para garantir o desempenho ideal da antena em uma aplicação específica (WALTER, 2020).

## 2.2 Conceitos e principais parâmetros de antenas

Conforme observado por Balanis (2005), ao avaliar o desempenho de uma antena, não se faz necessário explicitar todos os seus parâmetros, uma vez que muitos deles estão interligados. Portanto, neste trabalho, foram selecionados os conceitos e parâmetros de antenas que se considerou mais apropriados para a apresentação, visando proporcionar uma visualização mais clara e uma interpretação mais precisa dos resultados.

### 2.2.1 Eficiência

A eficiência de uma antena é um parâmetro fundamental que mede sua capacidade de converter a energia elétrica fornecida em energia eletromagnética irradiada. Em outras palavras, é uma medida de quão eficaz a antena é em transmitir ou receber sinais (BALANIS, 2005). Diferente do mundo ideal antenas sofrem perdas, algumas das principais perdas incluem:

- **Perdas de Condução:** São perdas causadas pela resistência dos materiais condutores da antena, que transformam parte da energia em calor (efeito Joule  $I^2R$ ). Essas perdas podem ser minimizadas usando materiais condutores de alta qualidade.
- **Perdas Dielétricas:** Se a antena possui materiais dielétricos, como isolantes, esses materiais podem causar perdas de energia.
- **Perdas de Reflexão:** Quando há um descasamento de impedância entre a antena e o cabo de alimentação, podem ocorrer reflexões de energia que reduzem a eficiência da antena.
- **Perdas de Radiação:** Mesmo em antenas direcionais, parte da energia é perdida em outras direções que não a direção desejada.

- **Perdas no Meio de Propagação:** As características do ambiente em que a antena opera, como obstruções e interferências, também podem resultar em perdas.
- **Ineficiências de Projeto:** Má escolha de geometria e dimensões, bem como imprecisões no projeto da antena, podem levar a ineficiências.

De modo geral, a eficiência de uma antena pode ser calculada pela Equação (2).

$$e_0 = e_\tau e_c e_d \quad (2)$$

Em que,

$e_0$  = eficiência total (adimensional)

$e_\tau$  = eficiência de reflexão (descasamento) =  $(1 - |\tau|^2)$  (adimensional)

$e_c$  = eficiência condutiva (adimensional)

$e_d$  = eficiência dielétrica (adimensional)

O  $\tau$  é o coeficiente de reflexão dado pela Equação (3).

$$\tau = (Z_{in} - Z_0)/(Z_{in} + Z_0) \quad (3)$$

$Z_{in}$  = É a impedância de entrada

$Z_0$  = É a impedância característica

Dentro do contexto da eficiência das antenas, é fundamental abordar um que se concentra no casamento de impedância: o VSWR (Voltage Standing Wave Ratio). O VSWR é uma medida fundamental em sistemas de comunicações RF (Rádio Frequência) e micro-ondas, que se concentra na qualidade da correspondência de impedância entre a antena e a linha de transmissão. Esta relação é fundamental para avaliar a eficácia da transmissão de sinais (LACERDA; SANTOS JUNIOR, 2008).

Em termos técnicos, o VSWR é determinado pela comparação entre a tensão máxima na linha de transmissão (tipicamente na própria antena) e a tensão mínima observada ao longo da onda estacionária que se forma na linha. Os valores de VSWR pode variar de 1 (ideal, sem energia refletida), até o infinito (quando toda a energia é refletida). O coeficiente de onda estacionária é calculado através da Equação (4).

$$VSWR = \frac{V_{max}}{V_{min}} \quad (4)$$

Onde,

$V_{max}$  = representa a tensão máxima na linha de transmissão.

$V_{min}$  = indica a tensão mínima observada na mesma linha.

A eficiência de uma antena se faz necessário para melhorar o desempenho de um sistema de comunicação. Isso pode ser alcançado através do uso de materiais condutores de alta qualidade, o dimensionamento do projeto de antena, correspondência de impedância adequada, eliminação de perdas de reflexão e minimização de perdas dielétricas. Também é importante considerar o ambiente em que a antena será usada para evitar perdas adicionais (BALANIS, 2005).

### 2.2.2 Diretividade

A diretividade de uma antena é um parâmetro fundamental em que a antena isotrópica serve como um ponto de referência para calcular a diretividade, uma vez que, em teoria, irradia energia igualmente em todas as direções, resultando em uma diretividade unitária (MEDEIROS, 2013). A diretividade é uma medida que estabelece a relação entre a intensidade de radiação em uma direção específica da antena e a intensidade média de radiação em todas as direções (BALANIS, 2005). Matematicamente, a diretividade pode ser escrita pela Equação (5).

$$D = \frac{U}{U_0} = \frac{4\pi U}{P_{rad}} \quad (5)$$

- $D$  = diretividade (adimensional)
- $U$  = intensidade de radiação (W/unidade de ângulo sólido)  $U = r^2 W_{rad}$
- $U_0$  = Intensidade de radiação de uma fonte isotrópica, dada por:  $U_0 = \frac{P_{rad}}{4\pi}$
- $P_{rad}$  = potência radiada total (W)

### 2.2.3 Ganho

O ganho de uma antena é uma medida que descreve sua capacidade de direcionar ou concentrar a energia de transmissão ou recepção em uma direção específica. O ganho de uma antena é expresso em decibéis (dB) ou decibéis isotrópicos (dBi) para o ganho diretivo, e é fundamental para determinar a eficiência e a diretividade da antena em um sistema de comunicação (BALANIS, 2005). O cálculo do ganho é dado em relação a uma antena de referência, que, em muitos casos, é uma antena isotrópica, que irradia energia igualmente em todas as direções.

De modo geral, o ganho da antena é definido como a razão entre a intensidade da radiação da antena em uma direção específica e a intensidade da radiação de uma antena de referência nas mesmas condições. Assim, a intensidade de radiação associada à potência irradiada isotropicamente é equivalente à potência recebida (de entrada) pela antena (SOUZA, 2019). Expresso em forma de equação, o ganho ( $G$ ) pode ser definido pela Equação (6).

$$G = \frac{4\pi U(\theta, \phi)}{P_{in}} \quad (6)$$

- $G$  é o ganho da antena em decibéis isotrópicos
- $U$  é a intensidade de radiação
- $P_{in}$  Potência de entrada

Desse modo, o ganho de uma antena é um fator crítico em sistemas de comunicação, uma vez que afeta a intensidade do sinal transmitido e recebido, o alcance da comunicação e a capacidade de superar obstáculos ou interferências. Portanto, o projeto de antenas e a escolha do tipo de antena são determinados em grande parte pela necessidade de obter um ganho adequado em uma aplicação específica.

### 2.2.4 Impedância de entrada

A impedância de entrada é uma medida que representa a resistência elétrica oferecida pela antena em seus terminais. Ela pode ser definida como a relação entre a tensão e a corrente em um par de terminais da antena, ou como a relação entre as componentes adequadas dos campos elétrico e magnético em um ponto específico (BALANIS, 2005). É importante que a impedância de entrada da antena esteja adaptada à impedância da linha de transmissão para maximizar a transferência de energia entre a antena e o sistema de transmissão ou recepção.

Uma impedância mal adaptada pode resultar em perdas significativas de energia e redução do desempenho da antena (ARAUJO, 2019).

Quando a impedância da antena não casa com a da linha de transmissão conectada a um transmissor ou receptor, o sistema sofre degradação devido à potência refletida. A discrepância de impedância entre a impedância de entrada da antena e a impedância característica da linha de transmissão resulta na reflexão da onda de tensão. (LACERDA; SANTOS JUNIOR, 2008).

O coeficiente de reflexão de tensão pode ser definido pela Equação (3).

$$\rho = \frac{Z_A - Z_0}{Z_A + Z_0} \quad (7)$$

- $Z_A$  = é a impedância da antena
- $Z_0$  = é a impedância característica

A impedância da antena pode ser obtida através do cálculo usando a Equação (8).

$$Z = R + jX \quad (8)$$

- $R$  é a parte resistiva, que está relacionada à perda de energia na antena.
- $X$  é a parte reativa, que está associada ao armazenamento e à liberação de energia.

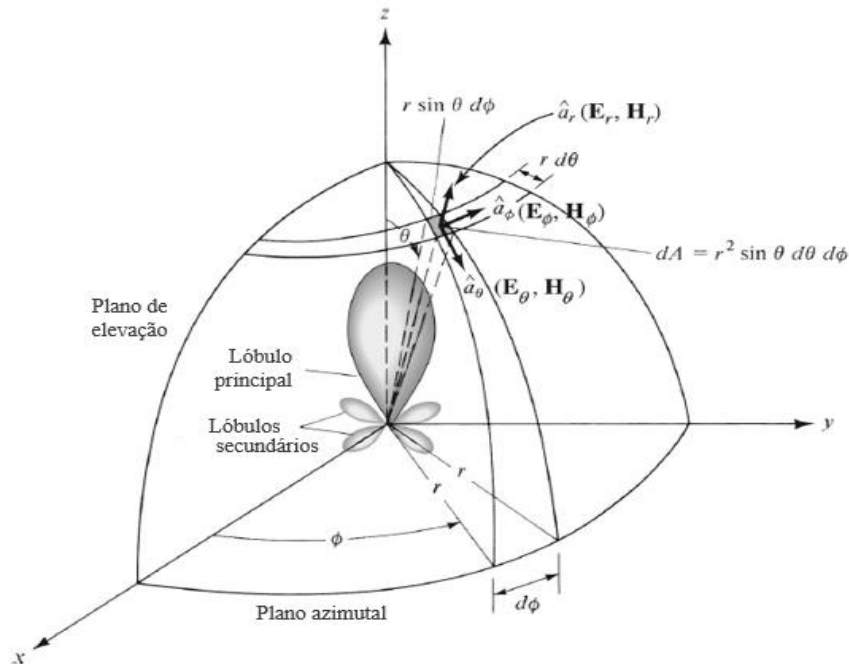
Em sistemas de comunicação, é comum que a impedância de saída do transmissor (geralmente 50 ohms) corresponda à impedância da linha de transmissão (também 50 ohms) e à impedância de entrada da antena. Isso é feito para minimizar reflexões de energia e garantir a eficiência da transmissão. No entanto, em algumas aplicações especializadas, como antenas de recepção de sinais fracos, a correspondência de impedância pode ser projetada de forma diferente para otimizar o desempenho (ANDRADE, 2014).

### 2.2.5 Diagrama de radiação

O diagrama de radiação de uma antena fornece uma representação gráfica da distribuição da intensidade do campo eletromagnético ao redor da antena. A representação gráfica dos diagramas de radiação é comumente feita em gráficos bidimensionais ou tridimensionais, onde as coordenadas representam a direção no espaço em relação à antena. Os

gráficos revelam como a potência irradiada pela antena varia em função do ângulo em relação à direção de máxima radiação (NASCIMENTO; SIMÕES, 2017). Um modelo de diagrama de radiação é ilustrado na Figura 2.5.

Figura 2.5 – Diagrama de radiação em um sistema esférico de coordenadas

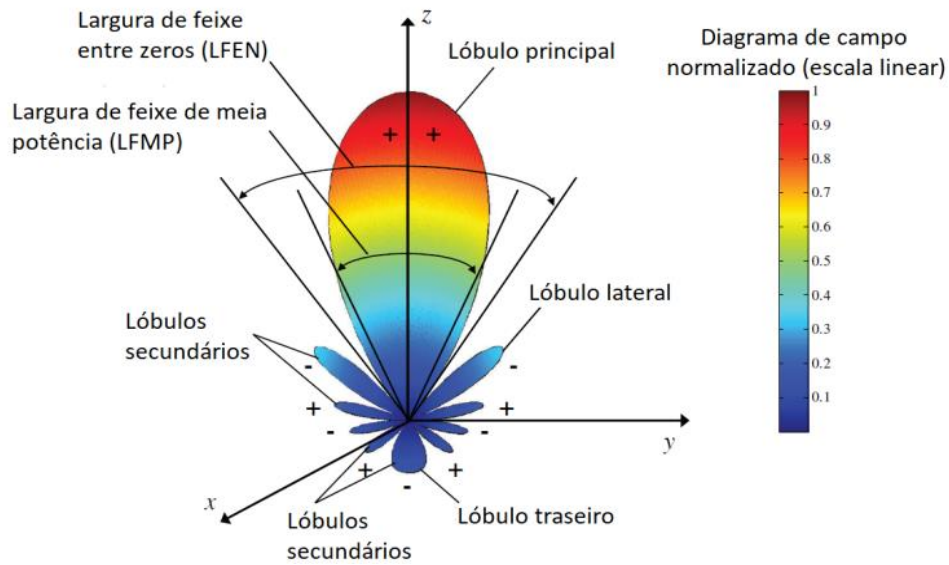


Fonte: Balanis (2005)

Dentro de um diagrama de radiação, são identificados os lóbulos, que representam regiões de maior intensidade de radiação em contraste com áreas de menor intensidade. Os lóbulos são subdivididos em diversas categorias, incluindo o lóbulo principal, lóbulos secundários, lóbulos laterais e o lóbulo traseiro. Essa classificação é essencial para compreender como a antena direciona a energia eletromagnética no espaço, e é de grande relevância para análises de antenas (BALANIS, 2005). A Figura 2.6 mostra um exemplo de diagrama de radiação normalizado em escala linear com indicação dos lóbulos.

É importante mencionar que os diagramas de radiação são frequentemente definidos com base em dois planos de referência: o plano E (elétrico) e o plano H (magnético). O plano E descreve a radiação em relação à altura, enquanto o plano H descreve a radiação em relação à rotação ao redor do eixo da antena. Isso ajuda a compreender o comportamento direcional da antena em diferentes dimensões espaciais.

Figura 2.6 – Diagrama de radiação com a presença de lóbulos



Fonte: Soares (2021)

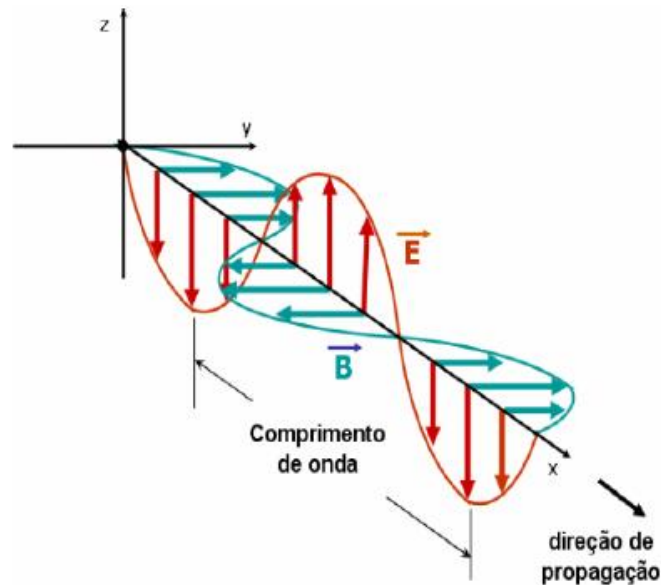
### 2.2.6 Polarização

A polarização de antenas é um conceito fundamental na engenharia de telecomunicação. Ela descreve a orientação espacial do campo elétrico de uma onda eletromagnética em relação ao tempo e ao espaço. Concretamente, a polarização é representada pela trajetória traçada ao longo do tempo, pela extremidade do vetor do campo elétrico em um ponto fixo do espaço (BALANIS, 2005).

A antena de transmissão e a antena de recepção devem estar polarizadas da mesma maneira para otimizar a transferência de energia entre elas. Se as polarizações não coincidirem, ocorrerá uma perda de sinal devido ao desacoplamento entre as antenas (BALANIS, 2005).

Uma onda harmônica no tempo é considerada ter polarização linear quando, em qualquer ponto do espaço, o vetor do campo elétrico ou magnético está alinhado ao longo de uma mesma linha reta em todos os momentos (MEDEIROS, 2013). Essa característica implica que a orientação do campo permanece constante ao longo do tempo em qualquer ponto do espaço, como ilustra a Figura 2.7.

Figura 2.7 – Onda eletromagnética - campo elétrico  $\vec{E}$  e densidade de fluxo magnético  $\vec{B}$  oscilando em fase no vácuo



Fonte: Medeiros (2013)

Os três principais tipos de polarização e suas características estão apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1– Definição e exemplos de polarização

Polarização	Definição	Exemplo
<b>Linear</b>	Uma onda harmônica no tempo tem polarização linear se em qualquer ponto do espaço o vetor campo elétrico ou magnético é orientado ao longo da mesma linha reta em qualquer instante	Geralmente os <i>patch</i> retangulares apresentam essa característica
<b>Circular</b>	Uma onda harmônica no tempo tem polarização circular, se o vetor campo elétrico ou magnético em qualquer ponto do espaço traçar um círculo em função do tempo.	Diversas formas de <i>patch</i> são capazes de proporcionar essa característica: quadrado, circular, pentagonal, triangular e entre outras.
<b>Elíptica</b>	Uma onda harmônica no tempo tem polarização elíptica, se a extremidade do vetor de campo elétrico ou magnético traçar uma elipse no espaço, em função do tempo. Podendo ser polarizada a direita ou a esquerda.	Não é uma polarização linear e nem circular; o campo deve ter duas componentes lineares ortogonais; as duas componentes podem ou não ter a mesma magnitude.

Fonte: Adaptado de Balanis (2005)

### 2.2.7 Largura de banda

A largura de banda de uma antena é definida como a faixa de frequência na qual o desempenho da antena, em relação a certas características, atende a padrões específicos. Ou seja, é o intervalo em que o ganho, impedância de entrada, nível do lóbulo lateral, eficiência de radiação e demais parâmetros, estão dentro de um valor aceitável se comparados com a frequência central (BALANIS, 2005). A mensuração da largura de banda é comumente expressa em termos do valor percentual, levando em consideração os componentes de frequência superior e inferior do intervalo em que a largura de banda está inserida.

Para antenas de largura de banda estreita é usada a Equação (9) para expressar a faixa de operação da antena.

$$BW (\%) = \frac{f_2 - f_1}{f_0} * 100 \quad (9)$$

Em que,

$f_0$  = Frequência central para qual a antena foi projetada para operar

$f_1$  = Frequência da borda limite inferior para qual a antena trabalha dentro do aceitável

$f_2$  = Frequência da borda limite superior para qual a antena trabalha dentro do aceitável

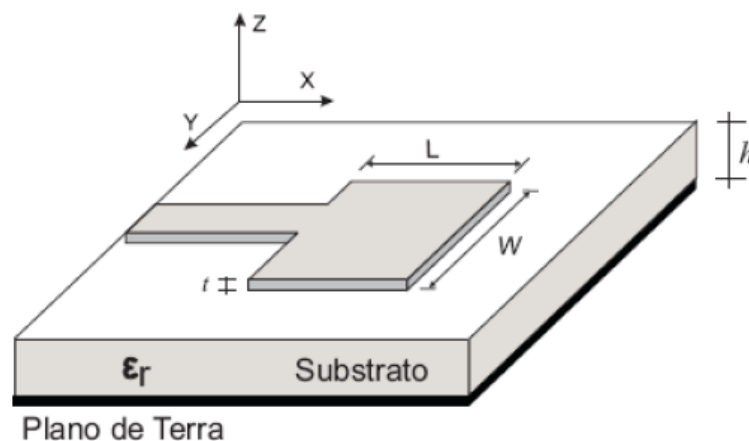
### 3 ANTENAS DE MICROFITA

Em razão dos avanços contínuos nas tecnologias relacionadas a circuitos integrados e à crescente tendência de miniaturização de dispositivos eletrônicos, surge uma demanda por componentes de menor porte e alto desempenho. Nesse contexto, as antenas desempenham um papel crítico, atuando como dispositivos habilitadores que eficazmente transformam ondas guiadas em ondas radiadas e vice-versa (SILVA, 2015).

Nos últimos anos observa-se um crescente avanços no campo de antenas planares, notadamente as antenas de microfita, devido à suas vantagens em relação a outras antenas de micro-ondas. Essas antenas demonstram ser ideais para uma ampla gama de aplicações que demandam integração em qualquer tipo de superfície, com técnicas de fabricação de circuitos impressos de baixa complexidade, ao mesmo tempo em que oferecem notável robustez mecânica. (BALANIS, 2005).

Como mencionado no capítulo 1, antenas de microfita tornaram-se populares na década de 70. Estas antenas são constituídas por um componente metálico irradiante, conhecido como *patch*, que é impresso sobre uma camada de material dielétrico, localizada sobre um plano de terra na face inferior do substrato da antena, conforme ilustrado na Figura 3.1. A flexibilidade dessas antenas de microfita permite sua adaptação em diversos dispositivos, o que as torna uma escolha viável para aplicações em fuselagens de aeronaves, mísseis, comunicação moveis e aeroespaciais (PEREIRA, 2018).

Figura 3.1 – Antena de microfita



Fonte: Balanis (2005)

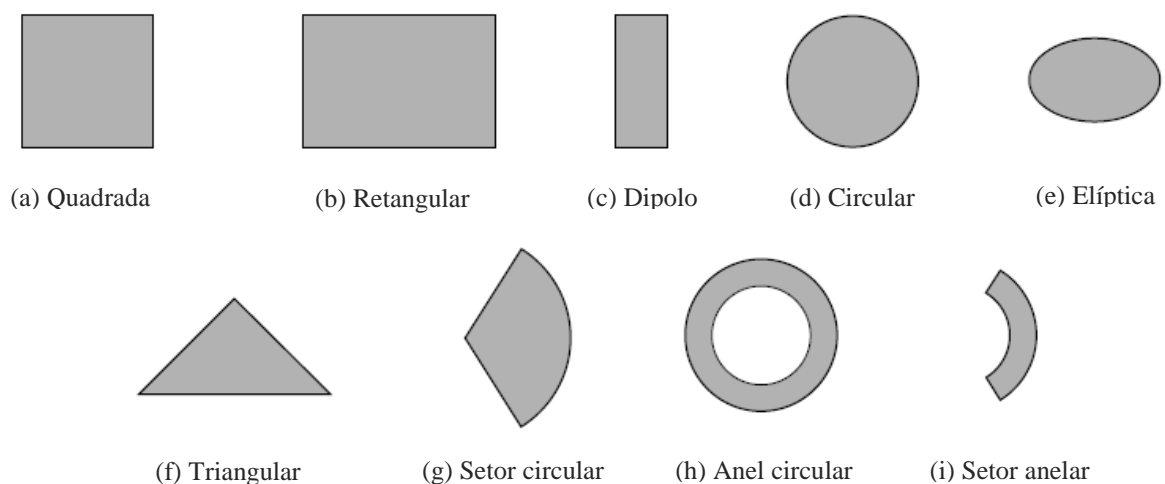
### 3.1 Patch

O *patch* de antenas de microfita são frequentemente projetados de forma a ressoar em uma determinada frequência de operação, e sua forma pode variar para otimizar o desempenho em termos de ganho, largura de banda e diagrama de radiação. Além disso, a geometria e a posição do *patch* em relação ao plano de terra e ao substrato também desempenha um papel importante no desempenho da antena (BALANIS, 2005).

A geometria do elemento radiador da antena de microfita pode assumir diversas formas, como por exemplo: quadrada, retangular, circular, dipolo, elíptica, triangular, bem como combinações dessas formas (MORAIS, 2011). O material condutor predominante usado na composição do *patch* e do plano de terra é geralmente o cobre.

As configurações com geometrias de *patch* quadrados, retangulares e circulares são amplamente adotadas devido à sua facilidade de análise, fabricação e características de radiação atraentes. No entanto, além dessas configurações convencionais, a incorporação de fendas (*slots*), em *patch* de antena de microfita também é comumente empregada. Neste contexto, será explorado o projeto de uma antena *patch* com fendas, enfatizando a importância das características geométricas, design e na otimização de desempenho da antena (OLIVIERA, 2008). Na Figura 3.2, é possível visualizar as diversas formas geométricas desses elementos radiadores.

Figura 3.2 – Formas da geometria do *patch* de uma antena de microfita



Fonte: Balanis (2005)

### 3.2 Substrato

O substrato de uma antena de microfita refere-se a uma camada dielétrica que serve como a base sobre a qual os elementos radiantes da antena são construídos. Esse substrato é

geralmente feito de material dielétrico, e tem características elétricas específicas que moldam o desempenho da antena (MORAIS, 2011).

Por definição, os substratos apresentam dois parâmetros críticos que precisam ser cuidadosamente considerados ao longo do projeto da antena: a constante dielétrica e a espessura do substrato (SOUZA, 2019). A constante dielétrica exerce uma influência significativa na largura de banda da antena e na sua eficiência de radiação. Em resumo, quanto menor a constante dielétrica, menor será a eficiência de excitação da onda de superfície, resultando em uma alteração no diagrama de radiação da antena (CAVALCANTE, 2019). A Tabela 2, apresenta alguns dos diferentes tipos de substratos utilizados como dielétrico.

Tabela 2 – Materiais dielétrico e suas características

<b>Substratos</b>	<b>Constante Dielétrica (<math>\epsilon_r</math>)</b>	<b>Tangente de Perdas (<math>\tan \delta</math>)</b>
<b>FR4-Epóxi</b>	4,4	0,02
<b>Ferrita</b>	12	0
<b>Alumina</b>	9,2	0,008
<b>Duróide</b>	2,2	0,0009
<b>PTFE</b>	2,5	0,002

Fonte: Adaptado de Morais (2011)

Diferentes tipos de materiais podem ser empregados como substrato no projeto de antenas de microfita. A Tabela 2 exemplifica alguns substratos com suas respectivas constantes dielétricas e tangentes de perdas. Geralmente, esses materiais possuem constantes dielétricas com valores na faixa de  $2,2 \leq \epsilon_r \leq 12$ . Os substratos mais adequados para garantir o desempenho ideal das antenas são aqueles que são mais espessos e que apresentam constantes dielétricas mais baixas (BALANIS, 2005).

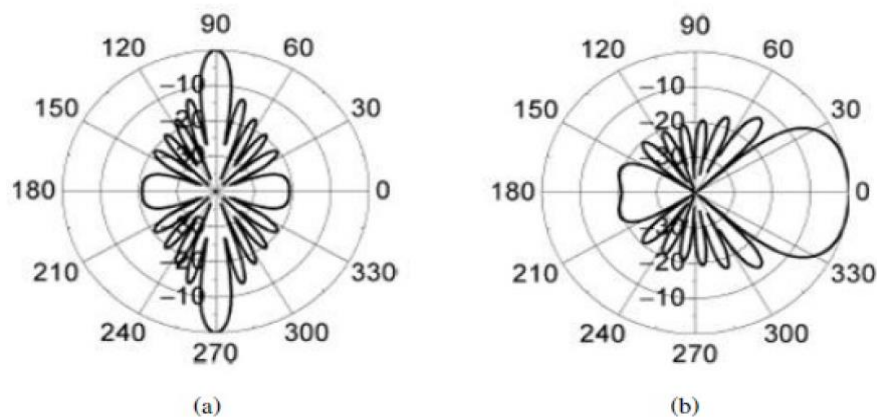
Ao projetar uma antena, é comum considerar que os substratos são extensos o suficiente para serem tratados como planos infinitos, com suas dimensões maiores superando as do elemento irradiante. Isso simplifica a análise e o projeto da antena. Essas características proporcionam maior eficiência, ampla largura de banda, simplificando a propagação das ondas no espaço (BALANIS, 2005). No entanto, é importante observar que essas propriedades vêm acompanhadas de um aumento nas dimensões dos elementos da antena, cada tipo de material é utilizado conforme parâmetros e adversidades de resultados que se espera dentro do projeto de uma antena de microfita.

### 3.3 Plano terra

O plano terra é uma camada cujo material é geralmente o cobre, que está localizada na face inferior do substrato da antena, abaixo do elemento radiador (*patch*). Essa superfície condutora atua como um plano de referência tendo uma função refletora, e é parte integrante da estrutura da antena de microfita (BALANIS, 2005).

Por definição, esse material tem como finalidade evitar o desenvolvimento de um lóbulo traseiro intenso da antena, evitando o desenvolvimento de uma radiação indesejada nessa direção, ao mesmo tempo que atua como um sistema de aterramento. No contexto teórico, é comum descrever o plano de terra como infinito para simplificar os cálculos. Porém, já no campo prático, utiliza-se um plano a mesma medida que os limites do substrato (SOUZA, 2019). A Figura 3.3 ilustra o diagrama de radiação em função do plano de terra.

Figura 3.3 – Diagramas de radiação em função do plano terra. a) Arranjo *broadside*. (b) Arranjo *end-fire*



Fonte: Medeiros (2013)

Modificações neste componente têm demonstrado resultados positivos. A técnica do plano de terra truncado é eficaz na ampliação da largura de banda das antenas. No entanto, ao adotá-la, ocorre a introdução de descontinuidades adicionais na estrutura da microfita, resultando no aumento das ondas de superfícies (MEDEIROS, 2013).

### 3.4 Técnicas de alimentação

A seleção do método de alimentação para antenas de microfita é uma etapa crítica no processo do projeto, uma vez que influencia diretamente o desempenho e as características de radiação do sistema. Diversas técnicas de alimentação estão disponíveis para as antenas de microfita, e a escolha do método adequado depende de uma série de fatores, como requisitos

de largura de banda, diretividade, polarização e eficiência (SOUZA, 2019). A seguir, uma visão das principais técnicas de alimentação utilizadas em antenas de microfita, sendo:

- Alimentação através de uma linha de microfita
- Alimentação por meio de cabo coaxial
- Acoplamento por abertura
- Acoplamento por proximidade

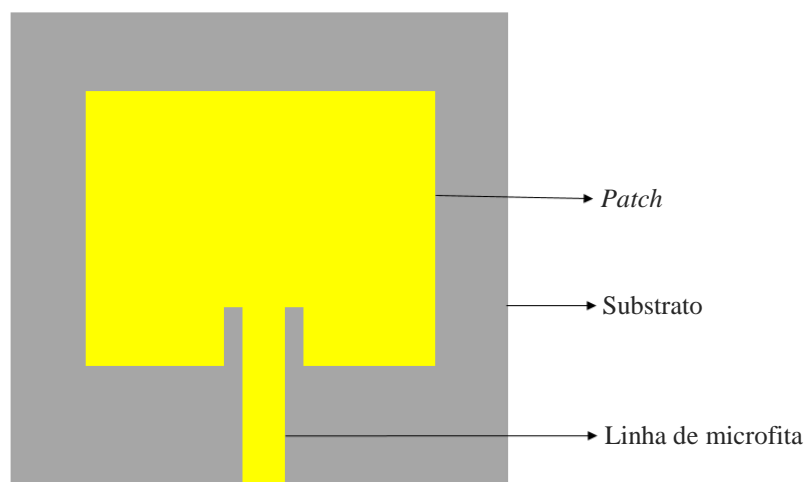
Nas próximas seções, serão abordados cada um desses métodos de alimentação, explicando suas aplicações e características específicas.

### 3.4.1 Alimentação através de uma linha de microfita

A estrutura da linha de microfita é composta por uma trilha condutora impressa no mesmo plano do substrato, que é apoiada pelo plano de terra. Essa configuração permite que a estrutura da antena permaneça completamente plana, tornando-a particularmente adequada para aplicações em circuitos integrados de micro-ondas (MORAIS, 2011).

Neste método de alimentação, um casamento de impedância eficaz é alcançado ao controlar a largura e comprimento da fita condutora sobre o substrato dielétrico de espessura específica. Além disso, técnicas de otimização de casamento de impedância, como o uso de cavidades, lacunas e a inserção de fendas, são usadas entre a linha de microfita e o *patch* radiante. Essas estratégias permitem um ajuste preciso das características da antena, resultando em desempenho aprimorado e eficiência (SILVA, 2017). Um modelo de antena alimentada por linha de microfita é ilustrado na Figura 3.4.

Figura 3.4 – Alimentação por linha de microfita

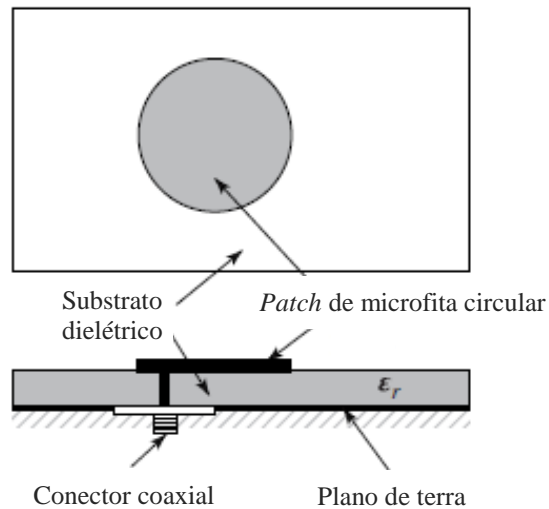


Fonte: Adaptado de Balanis (2005)

### 3.4.2 Alimentação por meio de cabo coaxial (ponta de prova)

O método de alimentação por meio de cabo coaxial oferece a simplicidade de projeto como uma de suas principais vantagens. Nesse caso, o condutor interno do cabo coaxial é conectado ao *patch* radiante da antena, enquanto o condutor externo se liga ao plano de terra. Essa abordagem que permite o ajuste da impedância de entrada da antena por meio do posicionamento do ponto de alimentação, facilitando a otimização do desempenho (MEDEIROS, 2013). No entanto, ela também apresenta limitações, como uma largura de banda mais restrita e complexidade de modelagem, especialmente quando utilizada com substratos espessos (espessura superior a 0,002 mm). Portanto, a escolha do método de alimentação depende das necessidades específicas do projeto e das restrições de desempenho da antena (SOUZA, 2019). Uma antena com alimentação por meio de cabo coaxial é ilustrada na Figura 3.5.

Figura 3.5 – Alimentação por meio de cabo coaxial



Fonte: Balanis (2005)

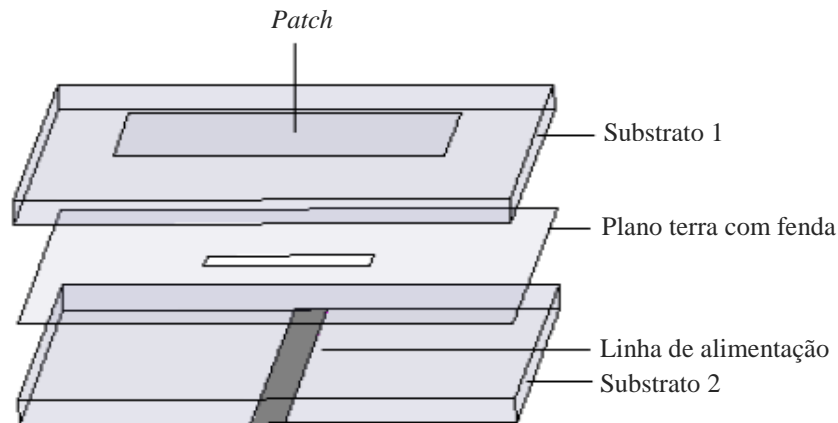
### 3.4.3 Acoplamento por abertura

O acoplamento por abertura se destaca como o método mais desafiador do ponto de vista da fabricação e também é conhecido por sua largura de banda estreita. No entanto, em termos de modelagem, o acoplamento por abertura é consideravelmente mais simples e resulta em radiação indesejada em níveis moderados (BALANIS, 2005).

A abordagem de acoplamento por abertura envolve a utilização de dois substratos separados por um plano de terra. No lado inferior do substrato inferior, encontra-se uma linha

de microfita cuja energia é acoplada ao *patch* através de uma fenda no plano de terra, que age como uma barreira física separando os dois substratos (ANDRADE, 2014). A Figura 3.6 ilustra um exemplo de uma antena com alimentação do acoplamento por abertura.

Figura 3.6 – Alimentação acoplamento por abertura

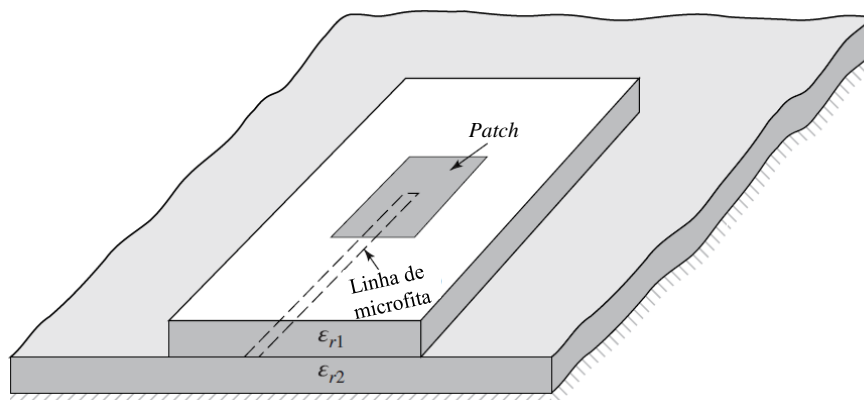


Fonte: Balanis (2005)

#### 3.4.4 Acoplamento por proximidade

O acoplamento por proximidade é uma técnica que compartilha semelhanças com o acoplamento por abertura, mas com uma distinção crucial: não envolve uma fenda no plano de terra. Nessa abordagem, a linha de microfita é posicionada entre dois substratos, e sua função é acoplar-se ao *patch* localizado na face superior da estrutura. Isso é realizado atravessando um dos substratos (SOUZA, 2019). A Figura 3.7 ilustra uma modelo de antena com alimentação de acoplamento por proximidade.

Figura 3.7 – Alimentação acoplamento por proximidade



Fonte: Balanis (2005)

Entre os quatro métodos discutidos nesse capítulo, o acoplamento por proximidade, se destaca por oferecer a maior largura de banda de até 13%. Além disso, essa técnica é caracterizada por sua modelagem relativamente simples e pela emissão de radiação espúria em níveis reduzidos. No entanto, é importante notar que a principal dificuldade associada a essa técnica reside na montagem da estrutura, que pode ser desafiadora (BALANIS, 2005).

### **3.5 Vantagens e desvantagens**

Antenas de microfita oferecem uma ampla faixa de frequência, que varia de aproximadamente 100 MHz a 100 GHz, o que lhe dá uma notável versatilidade de aplicação, conforme visto nos capítulos anteriores. Além dessas características de importantes aplicações, elas apresentam outras vantagens que as tornam uma escolha atrativa (ARAUJO, 2019). São algumas dessas vantagens:

- Tamanho compacto e leveza;
- Facilidade e baixo custo de fabricação;
- Adaptação a superfícies diversas;
- Compatibilidade com circuitos integrados;
- Robustez mecânica;
- Ampla faixa de frequência.


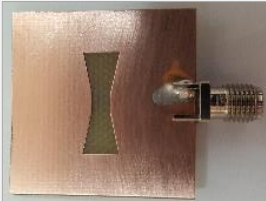
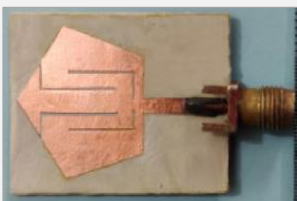

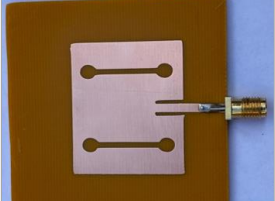
Contudo, as antenas de microfita também apresentam desvantagens a serem consideradas. Entre algumas dessas limitações é possível citar:

- Baixo ganho;
- Sensibilidade à espessura do substrato;
- Restrições de potência;
- Largura de banda estreita;
- Interferências externas.

### 3.6 Estado da arte

As antenas com fendas já têm aplicações em diversas faixas de frequência. A Tabela 3 apresenta uma lista de artigos e trabalhos analisados para fins comparativos, que abordam os parâmetros e desempenho associados à geometria com fendas, conforme encontrado na literatura.

Tabela 3 – Comparação do desempenho da antena com fendas proposto com outros publicados na literatura

Referência	ABDELAZIZ, (2019)	BRITO, (2020)	KADAM, (2021)	PATIL, (2022)	Neste trabalho
<b>Tipo de alimentação</b>	Linha de microfita	Linha de microfita	Linha de microfita	Linha de microfita	Linha de microfita
<b>Tamanho da antena (mm<sup>3</sup>)</b>	20×16,5×0,508	30×30×1,57	32×34×0,76	20×20×1,6	37,26×28,7×1,5
<b>f<sub>0</sub> (GHz) medida</b>	10/ 27,5/ 37,8	2,15/ 5/ 7,34	3,81/ 5,97/ 8,48	9,0	2,06/ 2,4
<b>ε<sub>r</sub></b>	2,2	4,4	3,0	4,4	4,4
<b>Largura de banda (MHz)</b>	101/ 450/ 1480	130/ 260/ 20	7900/ 350/ 620	9000	36/ 135
<b>Geometria da fenda</b>	Fendas em forma de T invertido	Fendas gravado em forma de gravata borboleta	Par de fendas em forma de Γ e L espelhadas	Fenda de anel circular	Fendas em forma de halteres
<b>Antena</b>					

Fonte: Elaborado pelo autor

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo, é apresentado os materiais e métodos utilizado para o desenvolvimento do projeto, tais como: modelagem, análise, simulação e fabricação de uma antena de microfita. Inicialmente é apresentado o desenvolvimento de uma antena de microfita convencional retangular operando na frequência de 2,45 GHz, em seguida é feita a análise da inserção de fendas no *patch* da antena, com o propósito de analisar a resposta em relação a frequência, desempenho e os principais parâmetros da antena projetada.

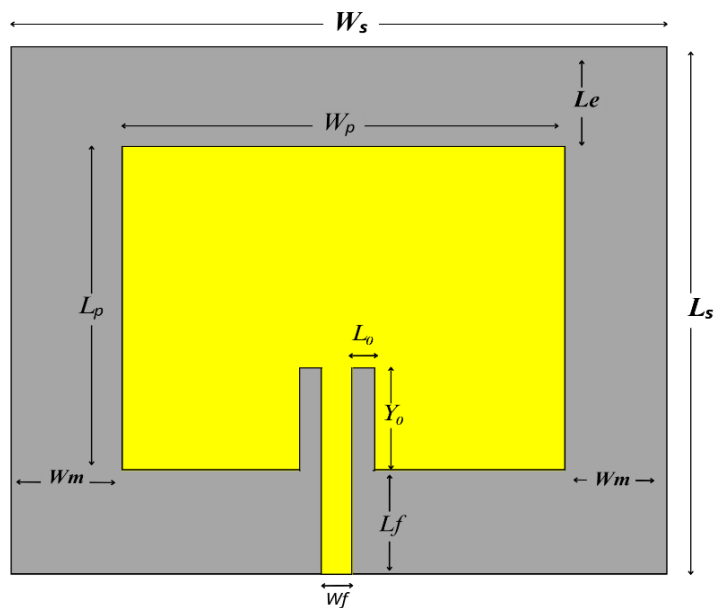
O projeto em questão se divide em três partes: especificações e cálculos, análise e simulações, e fabricação da antena.

Esse estudo permitirá avaliar o comportamento da antena conforme sua geometria, servindo de base para nortear o desenvolvimento de projetos futuros que envolvam confecção/fabricação e análise de antenas em microfita.

### 4.1 Projeto de uma antena de microfita

A configuração geométrica inicial da antena retangular proposta é ilustrada na Figura 4.1. Com base no desenvolvimento do projeto é feito a análise e estudos que estão comentados no próximo capítulo desse trabalho.

Figura 4.1 – Antena de microfita retangular



Fonte: Elaborado pelo autor

#### 4.1.1 Especificações do projeto

O primeiro passo ao construir uma antena é a determinação das dimensões e especificações do projeto de uma antena de microfita. Isso envolve o cálculo do comprimento ( $L_p$ ) e da largura ( $W_p$ ), é importante ressaltar que certos parâmetros fundamentais precisam ser definidos previamente. Estes parâmetros incluem a altura do substrato ( $h$ ), a permissividade do material do substrato ( $\epsilon_r$ ), a frequência de operação da antena ( $f_0$ ) e a impedância de entrada ( $Z_{in}$ ). O projeto e equações a seguir é feito com base no estudo do BALANIS, 2005. Na Tabela 4 são descritas as especificações de entrada para o projeto previamente determinadas.

Tabela 4 – Especificações de projeto da antena de microfita retangular

Especificações	
$h$	1,5 mm
$\epsilon_r$ (FR4)	4,4
$f_0$	2,45 GHz
$Z_{in}$	50 $\Omega$

Fonte: Elaborado pelo autor

#### 4.1.2 Cálculos do projeto

Com as especificações de projeto definidas, incluindo a seleção do material do substrato (FR4) o próximo passo é calcular a largura  $W_p$  da antena, através da Equação (10).

$$W_p = \frac{c}{2f_0} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad (10)$$

- $f_0$  é a frequência de operação da antena
- $\epsilon_r$  é a permissividade elétrica do substrato
- $c$  é a velocidade da luz no espaço livre ( $3 \times 10^8$  m/s)
- $W_p$  é a largura do *patch* da antena

Ao encontrar o valor de  $W_p$ , o próximo passo é o cálculo de  $L_p$  fazendo uso da Equação (11).

$$L_p = \frac{1}{2f_0 \sqrt{\epsilon_{reff}} \sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} - 2\Delta L \quad (11)$$

- $\Delta L$  é o comprimento do *patch* devido ao efeito de borda
- $\epsilon_{reff}$  é a constante dielétrica efetiva que leva em conta a velocidade de propagação na linha de microfita, devido ao efeito de borda
- $\mu_0$  é a permeabilidade magnética do vácuo
- $\epsilon_0$  é a constante de permissividade elétrica do vácuo

Para aplicar a Equação (11), é essencial iniciar calculando dois parâmetros: o  $\Delta L$  e a permissividade efetiva ( $\epsilon_{reff}$ ). Inicialmente, é determinado o valor da permissividade efetiva ( $\epsilon_{reff}$ ) e, em seguida, prosseguiu-se com o cálculo do  $\Delta L$ .

A permissividade efetiva ( $\epsilon_{reff}$ ) é determinada com a Equação (12).

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

O cálculo de  $\Delta L$  é dado pela Equação (13):

$$\Delta L = 0.412 * h \frac{(\epsilon_{reff} + 0,3) \left(\frac{W}{h} + 0,264\right)}{(\epsilon_{reff} + 0,258) \left(\frac{W}{h} + 0,8\right)} \quad (13)$$

Em seguida, é determinado o valor de  $w_f$ , que representa a espessura da linha de microfita que fornece a alimentação para a antena, conforme ilustrado na Figura 4.1.

Para calcular o  $w_f$  existem duas relações a ser analisadas, dada pela Equação (14).

$$Z_{in} = \begin{cases} \frac{60}{\sqrt{\epsilon_{reff}}} \ln \left[ \frac{8h}{w_f} + \frac{w_f}{4h} \right], & \frac{w_f}{h} \leq 1 \\ \sqrt{\epsilon_{reff}} \left[ \frac{W_f}{h} + 1,393 + 0,667 \ln \left( \frac{W_f}{h} + 1,444 \right) \right], & \frac{w_f}{h} > 1 \end{cases} \quad (14)$$

Assim, utilizando a relação que se aplica ao projeto e fazendo os devidos ajustes é encontrado o valor de  $w_f$ .

Depois de determinar o  $w_f$ , é necessário calcular o comprimento da fenda (*gap*)  $Y_0$ , como ilustrado na Figura 4.1. O comprimento da fenda é calculado pela Equação (15).

$$Y_0 = \frac{L_p}{\pi} \arccos \left( \sqrt{\frac{50}{Z_{in}}} \right) \quad (15)$$

Ao aplicar as equações mencionadas e realizar os cálculos pertinentes no projeto de uma antena de microfita retangular, chegou-se às dimensões e resultados de acordo com as especificações do projeto. Os resultados dos cálculos para as especificações do projeto da antena de microfita desse trabalho, já considerando as dimensões do substrato, são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 – Medidas e dimensões da antena de microfita retangular

Parâmetro	Valor (mm)	Parâmetro	Valor (mm)
$W_s$	60	$Y_0$	7,345
$L_s$	55	$L_0$	1
$W_p$	37,26	$L_f$	10,65
$L_p$	28,7	$W_f$	2,4
$Le$	15,65	$Wm$	11,37

Fonte: Elaborado pelo autor

### 4.1.3 Simulações da antena de microfita

#### 4.1.3.1 HFSS

O HFSS (*High-Frequency Structure Simulator*) é uma ferramenta de simulação eletromagnética amplamente utilizada no campo da engenharia. Desenvolvido pela empresa Ansys, o HFSS oferece uma variedade de recursos que permitem projetar, analisar e otimizar dispositivos e sistemas eletromagnéticos em uma ampla faixa de frequências e aplicações (ANSYS, 2023).

Uma das principais aplicações do HFSS está na modelagem e simulação eletromagnética. Ele permite criar modelos tridimensionais de dispositivos e estruturas, como antenas, antenas de microfita, guias de onda, circuitos impressos e componentes passivos, utilizando o método numérico dos elementos finitos (FEM) para resolver as equações de

Maxwell. Isso possibilita a análise de uma ampla gama de fenômenos eletromagnéticos complexos (MORAIS, 2011).

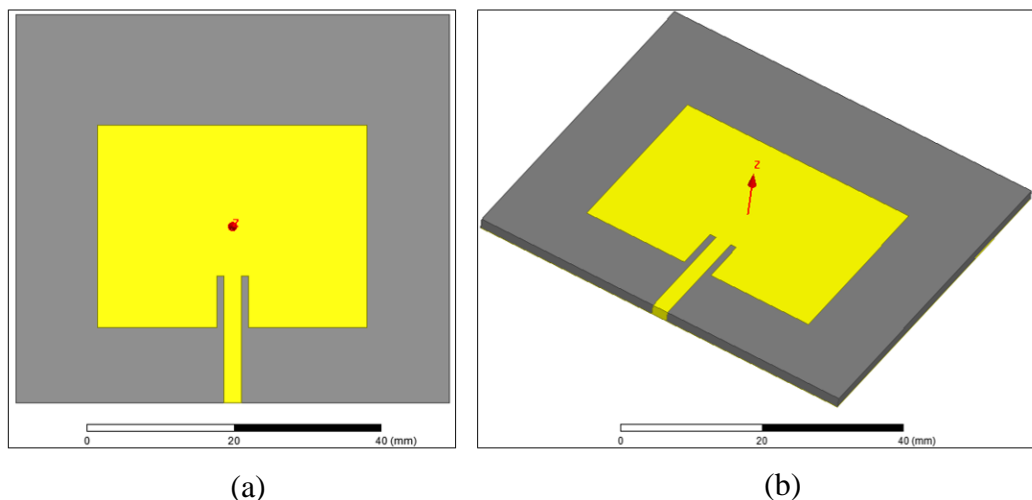
Por meio do HFSS é possível encontrar uma grande precisão na análise das antenas, facilitando na fabricação detalhada dos protótipos, nas previsões do comportamento de ondas eletromagnéticas e radiação (ANSYS, 2023). Visto isso, as simulações e análises deste trabalho foram realizadas por meio deste *software*.

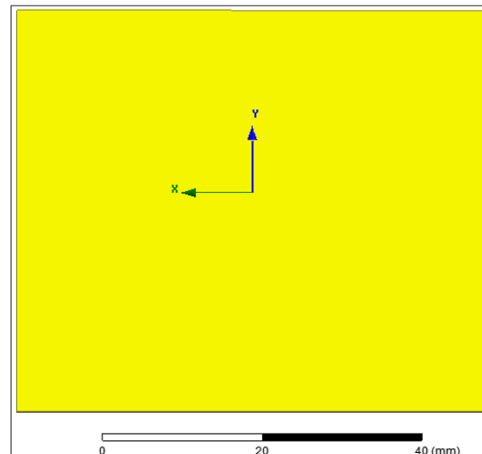
#### 4.1.3.2 Análises e simulações

De posse da etapa de cálculos concluídas, a etapa seguinte envolve a simulação da antena de microfita antes de prosseguir com o processo de fabricação. A etapa de simulação é essencial em um projeto de antenas, para otimizar o projeto. Esta, possibilita o ajuste de variáveis, como dimensões, materiais e configurações, a fim de maximizar a eficiência, reduzir custos e atender aos requisitos específicos do projeto.

Nesta etapa foi simulada uma antena de microfita retangular, observando seus parâmetros e resultados. Posteriormente, foram inseridas fendas no elemento irradiante da antena, moldando-as de forma semelhante a geometria de halteres (equipamentos de musculação utilizados para fortalecer e tonificar músculos), como pode ser visto na Figura 4.3. Em seguida, foi realizada uma análise do desempenho da antena à medida que as fendas eram parcialmente incorporadas à geometria. Os resultados estão explicitados no próximo capítulo. O objetivo foi examinar as variações nos parâmetros e performance da antena à medida que a sua geometria foi modificada. Na Figura 4.2 é ilustrada a antena *patch* retangular sem fendas que foi simulada no *software* HFSS.

Figura 4.2 – Simulação: a) Vista frontal antena sem fendas; b) Vista isométrica 3D antena sem fendas; c) Vista inferior (plano terra) antena sem fendas





(c)

Fonte: Elaborado pelo autor

Conforme mencionado anteriormente, após a simulação inicial da antena convencional retangular, foram introduzidas fendas com forma geométrica de halteres, ilustrado na Figura 4.3.

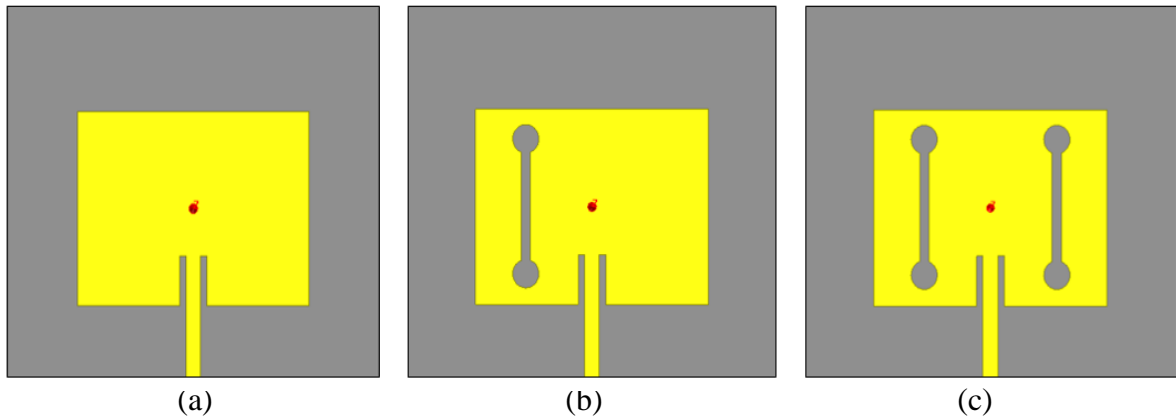
Figura 4.3 – Modelo de halteres equipamento utilizado em exercícios de musculação



Fonte: Astefit (2023)

Durante a fase de simulação, as fendas em formato de halteres foram gradualmente incorporadas ao *patch* da antena de microfita, uma de cada vez. Essas etapas de análise tiveram como objetivo avaliar os parâmetros e o desempenho da antena à medida que cada fenda era introduzida. Para alcançar esse objetivo, foram realizadas simulações de três tipos de antenas, considerando e comparando os 3 cenários, como pode ser visto na Figura 4.4. Os resultados das simulações serão apresentados no capítulo de resultados e discussões.

Figura 4.4 – a) Antena sem fendas no *patch*; b) Antena com uma fenda em forma de halteres adicionada ao *patch*; c) Antena com duas fendas em forma de halteres adicionada ao *patch*.

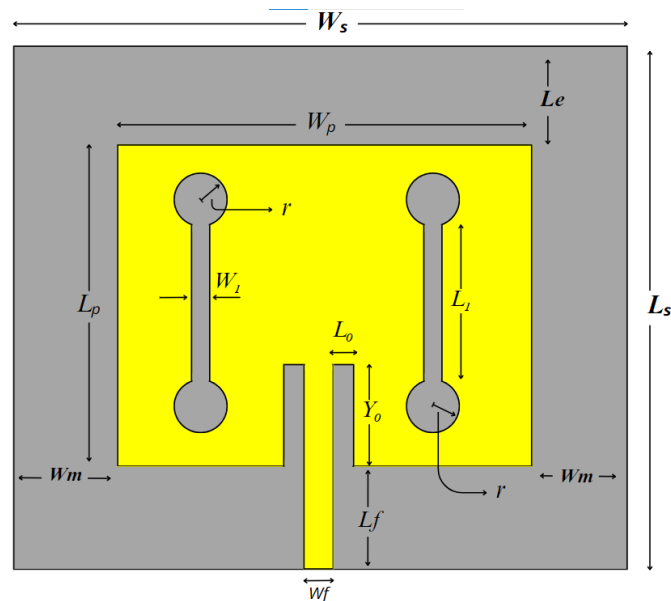


Fonte: Elaborado pelo autor

#### 4.1.4 Fabricação da antena de microfita

A fase final do processo de desenvolvimento de uma antena é a sua fabricação, na qual a antena é efetivamente fabricada, conforme ao projeto desenvolvido. Durante essa fase, são utilizados materiais, componentes e técnicas essenciais para confecção, de acordo com as especificações do projeto, a fim de assegurar o funcionamento da antena conforme os resultados previstos em simulação. Diante dos estudos e análises comentadas no capítulo 5, a antena selecionada para a fabricação foi a antena de microfita com duas fendas, cujo modelo é ilustrado na Figura 4.4 (c). O modelo da antena com as dimensões detalhadas é ilustrado na Figura 4.5.

Figura 4.5 – Antena a ser fabricada com duas fendas em forma de halteres adicionada ao *patch*.



Fonte: Elaborado pelo autor

Os valores das dimensões e parâmetros ilustrados na Figura 4.5, onde mostra a antena com duas fendas em forma de halteres adicionada ao *patch* estão detalhadamente descritos na Tabela 6.

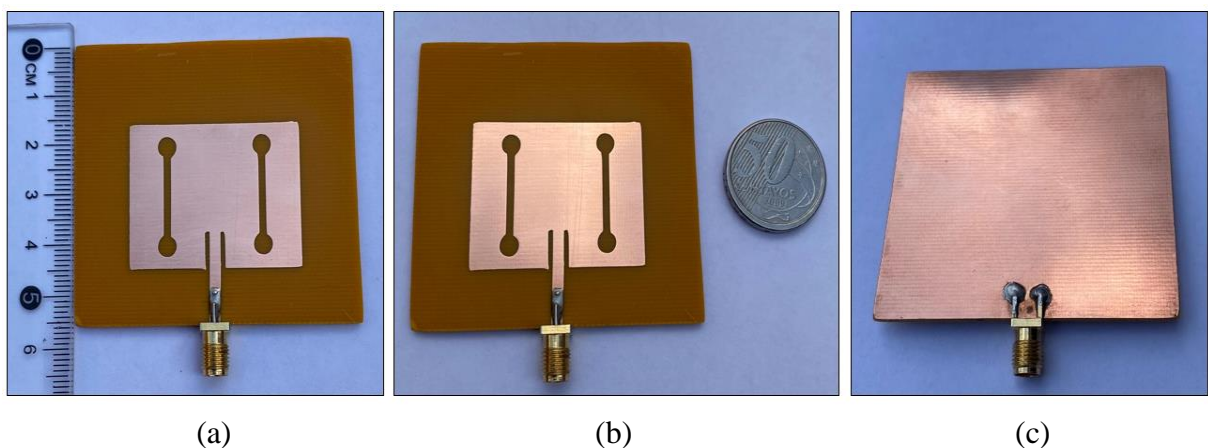
Tabela 6 – Dimensões e medidas completa da antena com duas fendas.

Parâmetro	Valor (mm)	Parâmetro	Valor (mm)
$W_s$	60	$Y_0$	7,345
$L_s$	55	$L_0$	1
$W_p$	37,26	$L_f$	10,65
$L_p$	28,7	$W_f$	2,4
$Le$	15,65	$Wm$	11,37
$L_l$	15,9	$W_1$	1,5
$r$	2,1		

Fonte: Elaborado pelo autor

Dentro do processo de fabricação são realizados os ajustes finais e os testes para garantir que a antena atenda aos requisitos de desempenho estabelecidos. Nessa etapa, a precisão e a atenção aos detalhes no processo de fabricação desempenham um papel fundamental na qualidade final do produto. A Figura 4.6 mostra a antena de microfita após o processo de fabricação.

Figura 4.6 – a) Vista frontal antena fabricada com duas fendas em forma de halteres; b) Vista frontal antena fabricada com duas fendas em forma de halteres comparada com uma moeda; c) Vista inferior (plano de terra) antena fabricada.



Fonte: Elaborado pelo autor

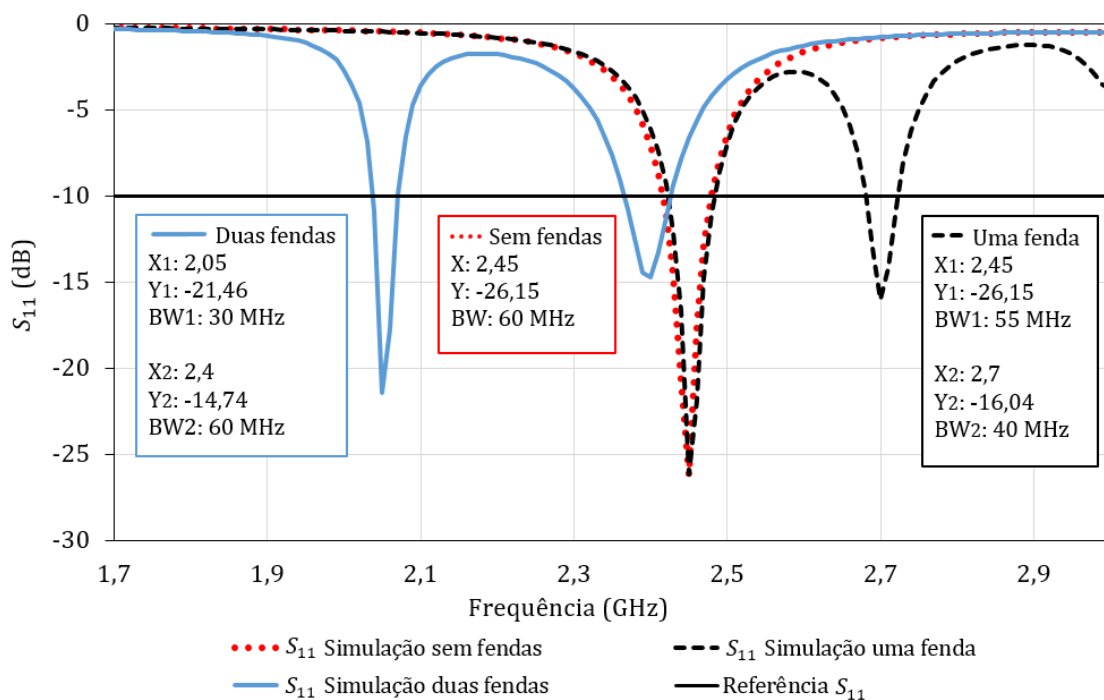
## 5 RESULTADOS E DISCURSSÕES

Neste capítulo, serão abordados os resultados provenientes das simulações e medições experimentais realizadas no estudo da antena de microfita com fendas. As simulações foram conduzidas utilizando o *software* HFSS, explorando três cenários relacionados à antena de microfita. Esses cenários incluíram a configuração sem fendas, que atendeu às especificações do projeto para uma frequência de 2,45 GHz, bem como uma configuração com uma fenda e, com duas fendas adicionadas ao elemento irradiante (*patch*) da antena. Os resultados para cada cenário serão apresentados ao longo deste capítulo. Os resultados experimentais, por sua vez, foram todos coletados com o auxílio do analisador vetorial portátil LiteVNA-64, utilizado para medir parâmetros de antenas.

### 5.1 Simulações e análises

O primeiro parâmetro a ser analisado é o ( $S_{11}$ ). O coeficiente de reflexão de uma antena de microfita é um parâmetro crítico que mede a quantidade de energia que é refletida de volta para a fonte, em comparação com a energia que é transmitida pela antena. A Figura 5.1 exibe o  $S_{11}$  (dB) em uma análise comparativa dos resultados dos três cenários de simulações.

Figura 5.1 – Comparação da simulação  $S_{11}$  entre antenas sem fendas, com uma fenda e com duas fendas.



Fonte: Elaborado pelo autor

Para o primeiro cenário, conforme a antenna é ilustrada na Figura 4.4 (a), que envolve uma antenna retangular sem fendas, o coeficiente de reflexão é ilustrado na Figura 5.1 é de 26,15 dB a uma frequência de 2,45 GHz, e largura de banda de 60 MHz. Esse valor para antenna sem fendas, demonstra um coeficiente de reflexão abaixo de 10 dB, garantindo que 90% da energia é transmitida, além de estar em conformidade com as especificações iniciais do projeto.

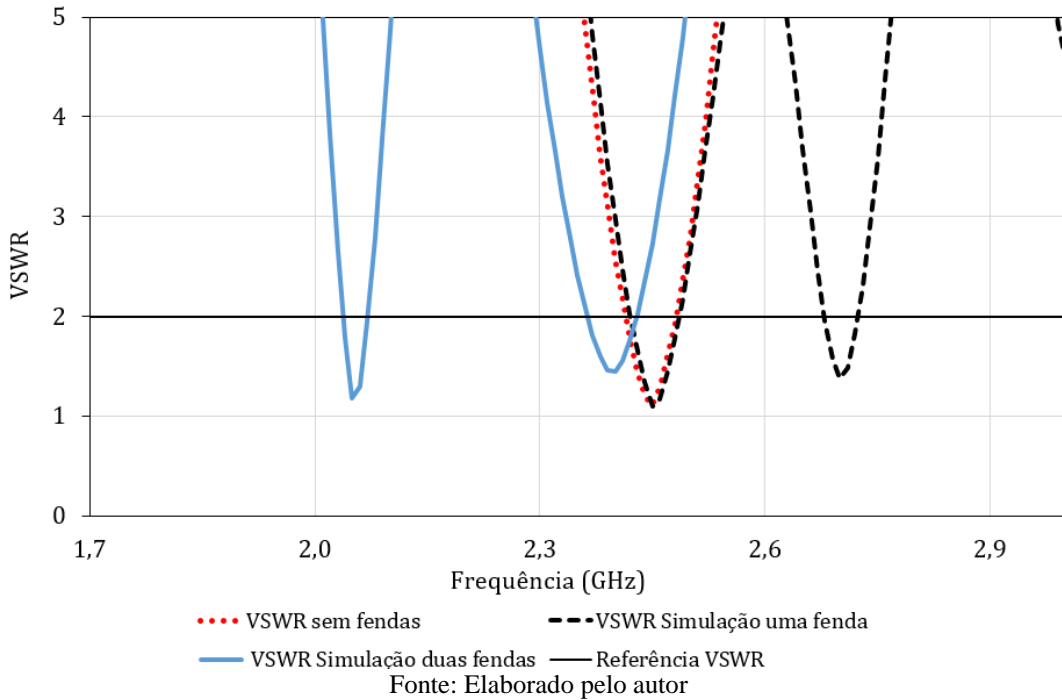
No segundo cenário, mediante simulação foi analisado os resultados da antenna de microfita com uma fenda em formato de halteres e com frequência de ressonância de 2.45 GHz, conforme a antenna é exibida na Figura 4.4 (b). Para essa antenna, observou-se o surgimento de uma segunda frequência. A primeira frequência é de 2,45 GHz, com um coeficiente de reflexão de 26,15 dB e largura de banda de 55 MHz. Enquanto a segunda frequência emergente é de 2,7 GHz, com um coeficiente de reflexão de 16,04 dB e com uma largura de banda de 40 MHz. Esses resultados são satisfatórios, uma vez que permanecem abaixo do limite sugerido de 10 dB, indicando a sua capacidade de operar em duas frequências (*dual-band*).

O terceiro cenário, que envolve uma antenna com duas fendas em formato de halteres no elemento irradiante, conforme ilustrado na Figura 4.4 (c), novamente é observado o surgimento de uma segunda frequência. A primeira frequência de 2,05 GHz é resultado da adição das fendas em forma de halteres à geometria da antenna, com um coeficiente de reflexão de 21,46 dB e uma largura de banda de 30 MHz, a segunda frequência é de 2,4 GHz, apresenta um coeficiente de reflexão de 14,74 dB e largura da banda de 60 MHz. Estes resultados mostram certa eficácia da antenna na conversão da energia transmitida em sinal irradiado, mantendo um bom coeficiente de reflexão e capacidade de operar em dual-band.

A Figura 5.2 apresenta o resultado do comportamento do VSWR (*Voltage Standing Wave Ratio*), um parâmetro essencial na avaliação de sistemas de transmissão de ondas eletromagnéticas. É exibido a comparação dos resultados da simulação do coeficiente de onda estacionária (VSWR) para os três cenários simulados e analisados: Antenna sem fendas, com uma fenda e com duas fendas.

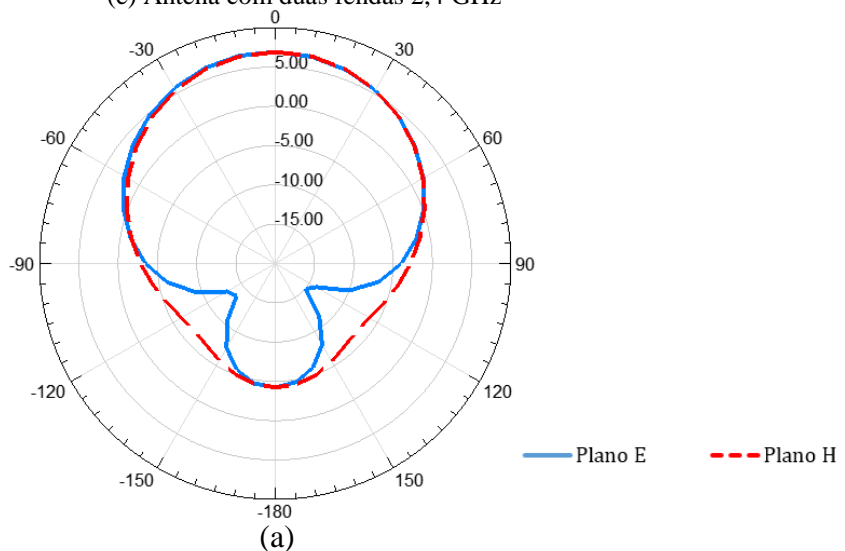
É observável na Figura 5.2 que, para todos os cenários de frequências, os valores de VSWR estão consistentemente abaixo do limite sugerido de 2, para algumas frequências é possível observar o valor próximo do ideal que é 1. Isso indica que, em todas as frequências e cenários considerados, os resultados do VSWR estabelecem uma relação eficiente entre o valor máximo e mínimo da onda estacionária.

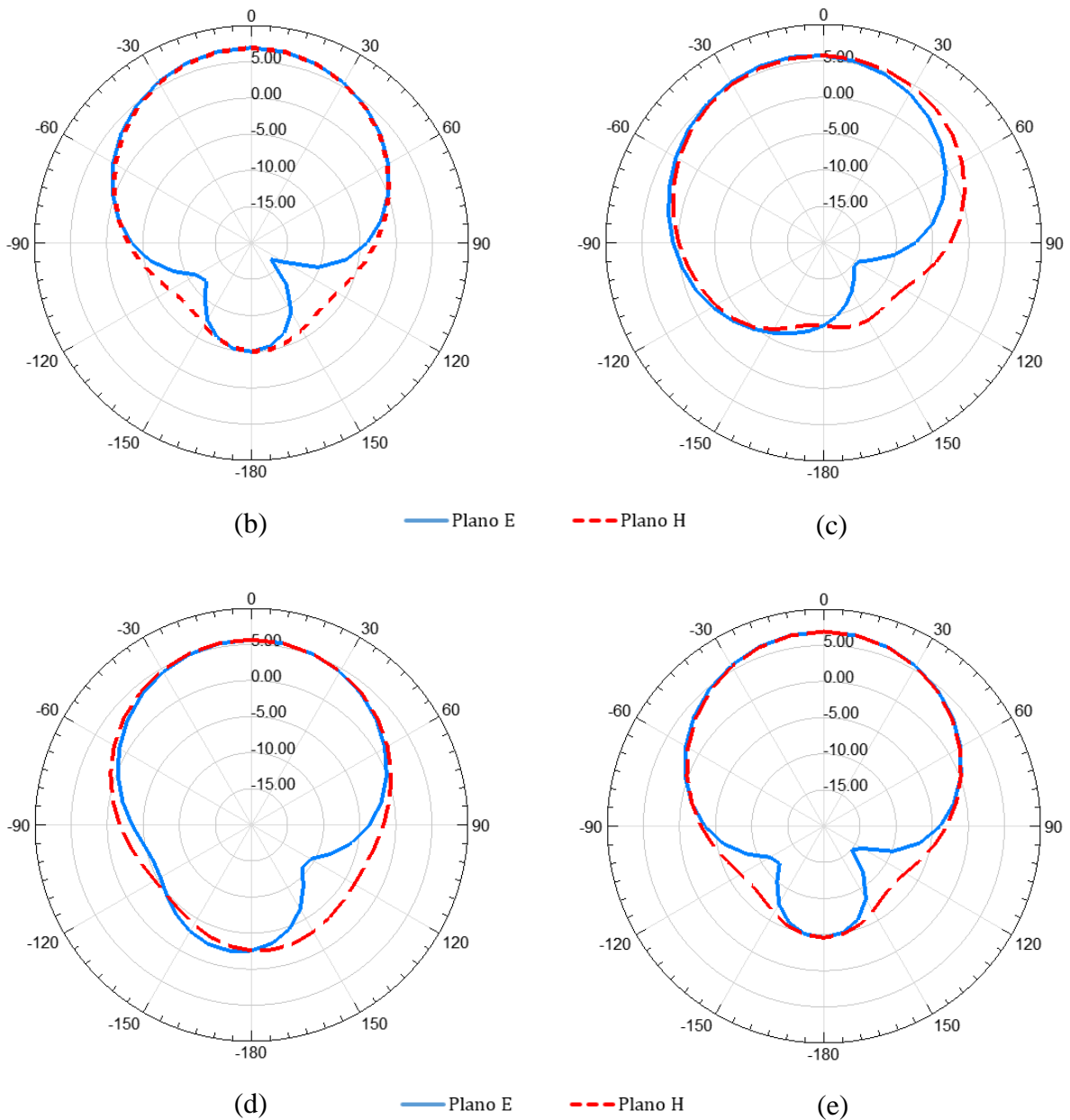
Figura 5.2 – Comparação simulação VSWR entre antenas sem fendas, com uma fenda e com duas fendas



Também foi analisado os diagramas de radiação 2D dos planos E e H para os três diferentes cenários das antenas, conforme ilustrado na Figura 5.3. Com base no resultado da simulação, observou-se a presença de um lóbulo traseiro significativo, o que implica na perda de parte da potência irradiada, ou seja, uma parcela da radiação está sendo direcionada para a direção oposta ao lóbulo principal, que é a direção desejada. A Figura 5.3 exibe os diagramas de radiação simulados do plano E e Plano H, para a antenas sem fenda operando na frequência de 2,45 GHz, para a antena com uma fenda operando a frequência de 2,45 GHz e 2,7 GHz e para antena simulada com duas fendas operando na frequência de 2,05 GHz e 2,4 GHz.

Figura 5.3 – Simulação dos diagramas de radiação, plano E e plano H: (a) Antena sem fendas 2,45 GHz; (b) Antena com uma fenda 2,45 GHz; (c) Antena com uma fenda 2,7 GHz; (d) Antena com duas fendas 2,05 GHz; (e) Antena com duas fendas 2,4 GHz





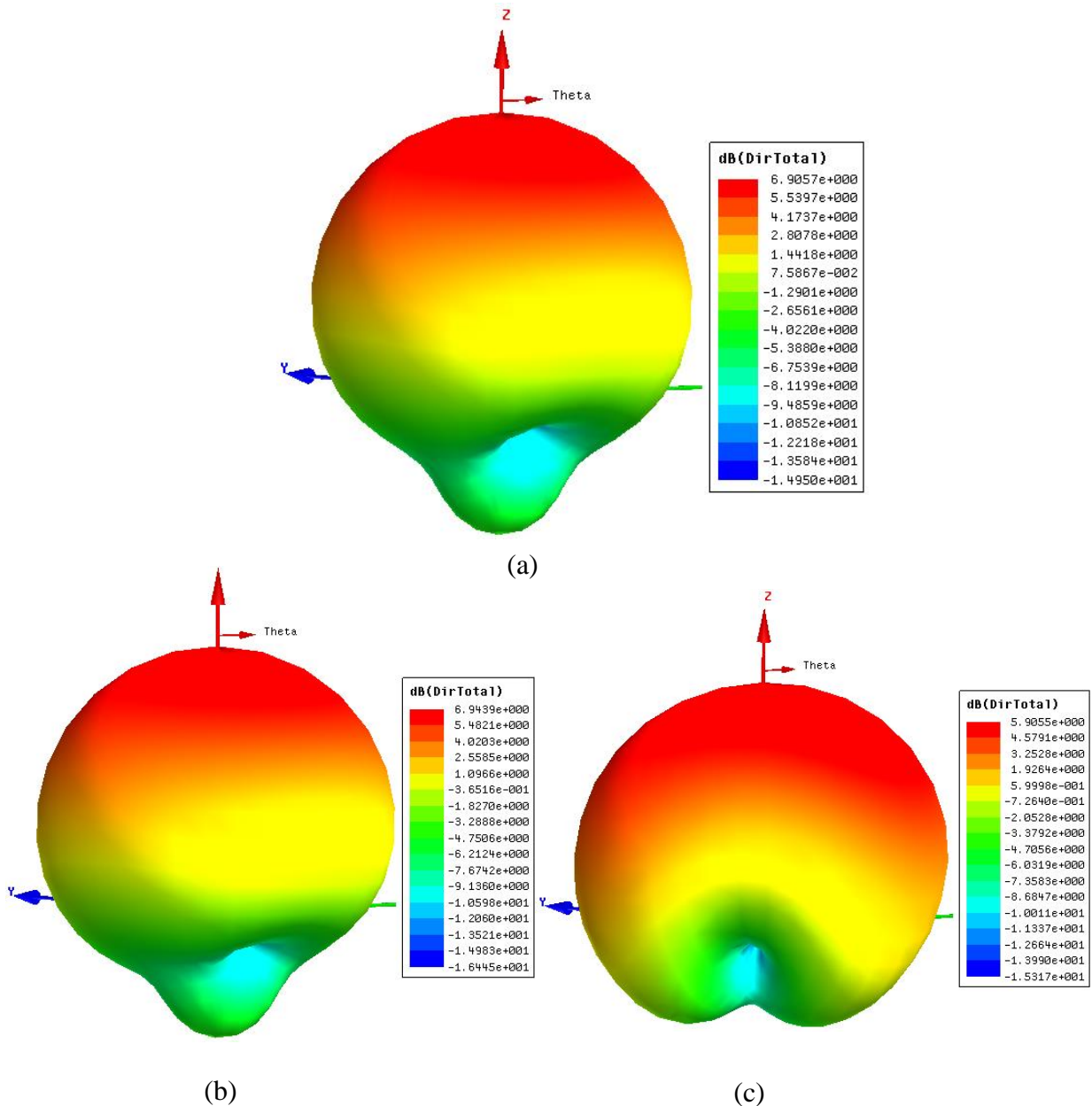
Fonte: Elaborado pelo autor

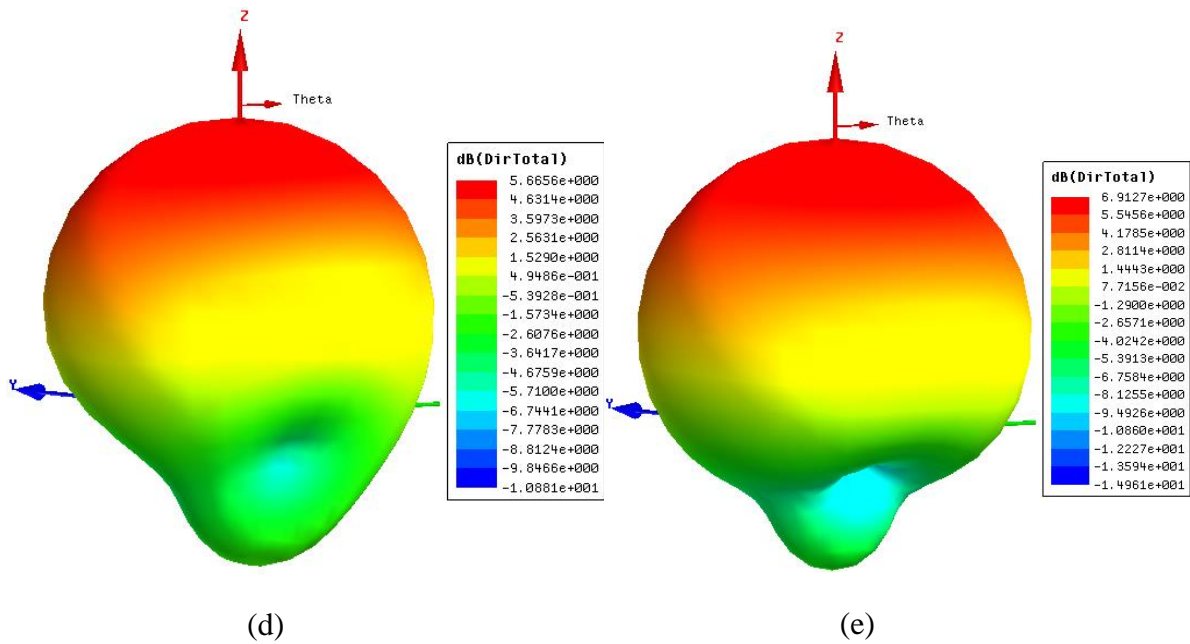
Os resultados do diagrama de radiação 3D do ganho direcional das antenas simuladas são mostrados na Figura 5.4. No cenário sem fendas onde a antena opera com frequência de 2,45 GHz, o ganho diretivo foi de 6,905 dBi, enquanto a antena com uma fenda apresentou um ganho diretivo de 6,943 dBi para a frequência de 2,45 GHz e ganho diretivo de 5,905 dBi para a segunda frequência de 2,7 GHz. Para a antena com duas fendas, o ganho diretivo simulado foi de 5,665 dBi para a frequência de 2,05 GHz e ganho diretivo de 6,912 dBi para a segunda frequência de 2,4 GHz, o que está em conformidade com as propriedades típicas dessas antenas.

No entanto, é observado que o ganho diretivo da antena diminuiu minimamente quando uma fenda foi introduzida e, posteriormente, teve um pequeno aumento quando duas fendas foram adicionadas ao *patch*, evidenciando uma alteração no desempenho à medida que a forma

geométrica do elemento irradiante da antena foi modificada. A Figura 5.4 exibe a simulação do ganho diretivo em 3D para os três cenários analisados, para a antenas sem fendas operando a frequência de 2,45 GHz, para a antena com uma fenda operando a frequência de 2,45 GHz e 2,7 GHz e para antena com duas fendas operando a frequência de 2,05 GHz e 2,4GHz.

Figura 5.4 – a) Simulação do ganho diretivo 3D: (a) Antena sem fendas 2,45 GHz; (b) Antena com uma fenda 2,45 GHz; (c) Antena com uma fenda 2,7 GHz; (d) Antena com duas fendas 2,05 GHz; (e) Antena com duas fendas 2,4 GHz

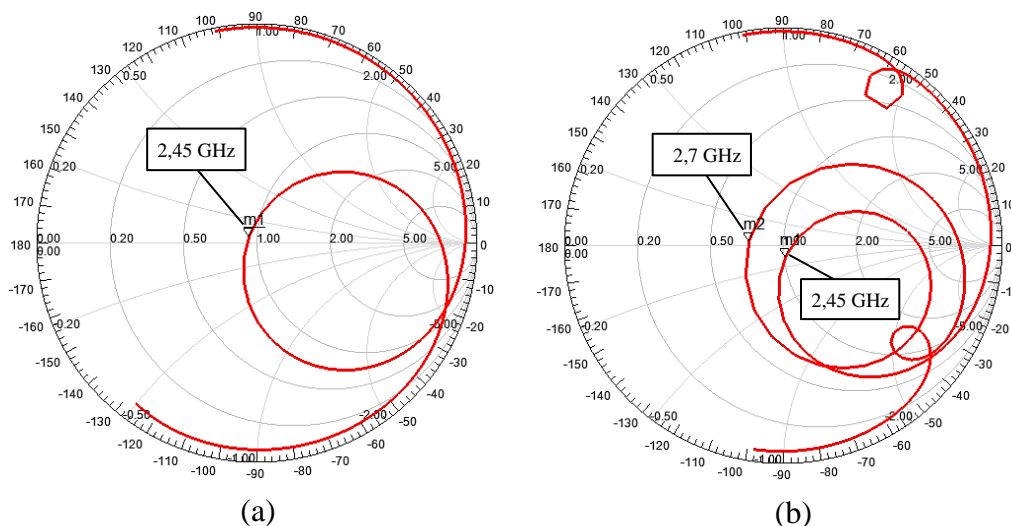


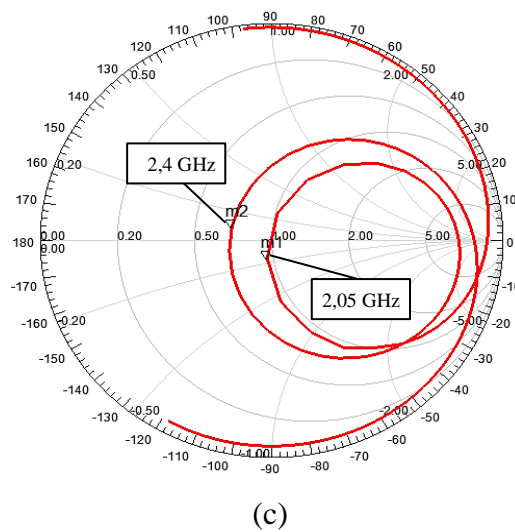


Fonte: Elaborado pelo autor

Através do diagrama de radiação 3D das antenas simuladas, conforme ilustrado na Figura 5.4, é notório a presença de características típicas de uma antena do tipo direcional. Nota-se que a maior concentração de potência irradiada ocorre no extremo do lóbulo principal, diminuindo à medida que se distancia do ponto de máxima radiação. A Figura 5.5 ilustra os gráficos da carta de Smith para os três cenários de antenas. A Figura 5.5(a) mostra a carta de Smith da antena sem fendas de frequência 2,45 GHz, a Figura 5.5(b) apresenta a carta de Smith da antena com uma fenda na frequência de 2,45 GHz e 2,7 GHz, a Figura 5.5(c) exibe a carta de Smith da antena com duas fendas operando em duas frequências de 2,05 GHz e 2,4 GHz.

Figura 5.5 – Simulação da Carta de Smith: (a) Antena sem fendas; (b) Antena com uma fenda; (c) Antena com duas fendas





Fonte: Elaborado pelo autor

A carta de Smith fornece informações valiosas sobre como a impedância na antena evolui ao longo de uma ampla gama de frequências, sendo a impedância de  $50 \Omega$  o ponto de referência para as antenas analisadas, os resultados são relativamente bons, visto que as frequências de operação da antena se aproxima da impedância de referência. Esta análise ajuda a otimizar a eficiência da antena e a adaptá-la a diferentes situações de operação.

## 5.2 Medições utilizando o LiteVNA-64

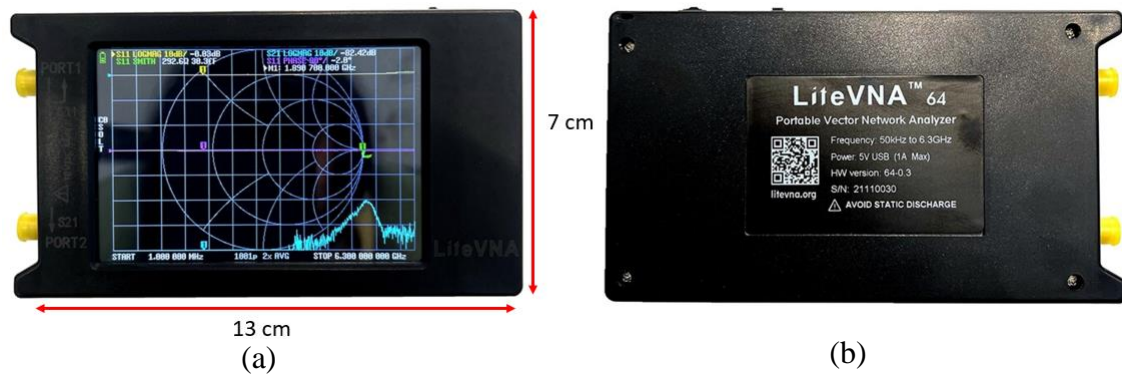
Após a análise e simulações detalhadas descritas no tópico anterior, avançou-se para a etapa seguinte, que envolve a realização de medições na antena fabricada, contendo duas fendas no formato de halteres no *patch*, conforme os modelos são ilustrados na Figura 4.5. Após a conclusão das simulações e fabricação, seguiu-se à medição dos resultados utilizado o equipamento de medição de baixo custo LiteVNA-64, visando uma comparação detalhada com os parâmetros simulados, com o intuito de avaliar a concordância entre a teoria e os dados práticos obtidos.

### 5.2.1 LiteVNA-64

O analisador vetorial LiteVNA-64 é um dispositivo eletrônico portátil utilizado na medição de parâmetros experimentais de antenas. Este dispositivo é capaz de analisar antenas em uma ampla faixa de frequência, variando de 50 KHz até 6,3 GHz, permitindo a medição de diversos parâmetros, incluindo o  $S_{11}$ , VSWR, bem como a representação gráfica da carta de

Smith, entre outros (MAHTAB, 2022). A Figura 5.6 apresenta o modelo utilizado para conduzir as medições experimentais neste estudo.

Figura 5.6 – a) Vista superior do LiteVNA-64; b) Vista inferior do LiteVNA-64



Fonte: Adaptado de aliexpress (2023)

Ao utilizar este dispositivo, foram identificadas algumas vantagens, devido às seguintes razões:

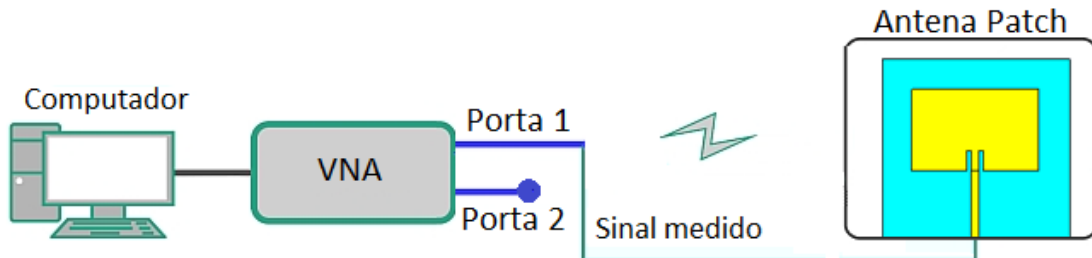
- Baixo custo: o LiteVNA-64 é uma solução acessível.
- Formato compacto e leve: sua portabilidade o torna prático e fácil de transportar.
- Intervenção direta dos estudantes: permite que os estudantes participem ativamente no desenvolvimento de seus trabalhos de conclusão de curso.
- Flexibilidade de uso: possibilita a realização de medições em diferentes ambientes.
- Integração com o computador: pode ser facilmente conectado a um computador para medições de diversos parâmetros em antenas, filtros, sensores entre outros.

Apesar de suas muitas vantagens, o LiteVNA-64 portátil apresenta algumas desvantagens, como a suscetibilidade à interferência elétrica externa e uma estrutura relativamente frágil. No entanto, ele continua a ser uma escolha sólida para estudos de antenas quando um analisador vetorial de bancada VNA não está disponível (MAHTAB, 2022).

A Figura 5.7 apresenta o *setup* de configuração usado para conduzir medições experimentais da antena de microfita deste trabalho. Com o dispositivo adequadamente calibrado e configurado, a antena é conectada a uma das portas do LiteVNA-64 por meio de um cabo. Este, por sua vez, está interligado a um computador para captura dos sinais e geração dos gráficos representativos dos parâmetros da antena. A leitura dos sinais medidos no LiteVNA-64 é viabilizada por meio de uma variedade de *software* sem custo que podem ser

utilizados no computador. Para este projeto específico, optou-se pelo *software* NanoVNA-APP para geração dos resultados mediante medição.

Figura 5.7 – *Setup* de configuração utilizado para medição da antenna

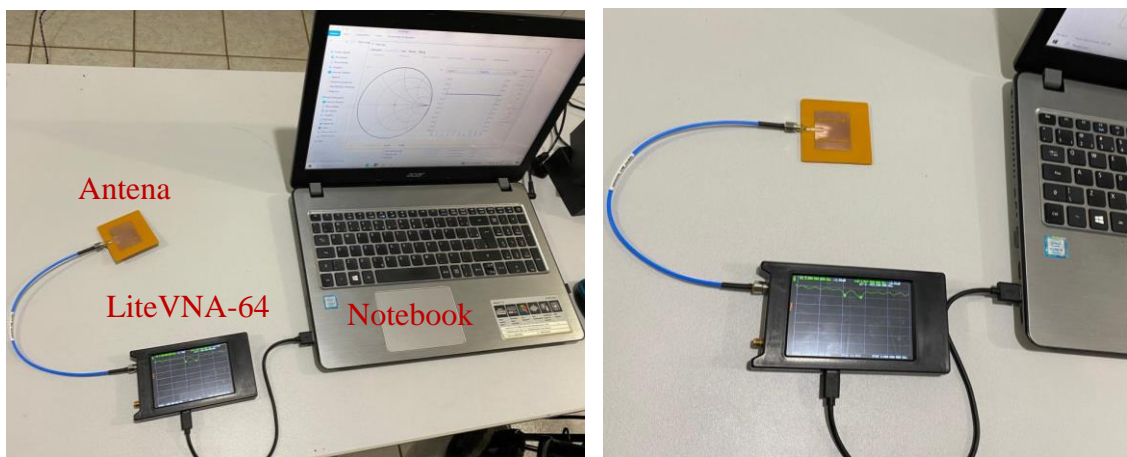


Fonte: Temcom electronic (2022)

### 5.2.2 Resultados

As medições experimentais dos parâmetros da antena de microfita com duas fendas foram conduzidas com o objetivo de realizar uma análise comparativa com os resultados previamente simulados. Procedeu-se com a medição e análise dos parâmetros mais relevantes disponibilizados pelo dispositivo. Durante o processo de obtenção dos resultados experimentais, foi empregado cuidados com o intuito de garantir a melhor precisão nos resultados, mesmo com os cuidados necessários foi notado interferência eletromagnéticas externa devido ao ambiente e características do dispositivo de medição. A Figura 5.8, mostra a configuração de bancada realizada para coleta de dados experimental da antena.

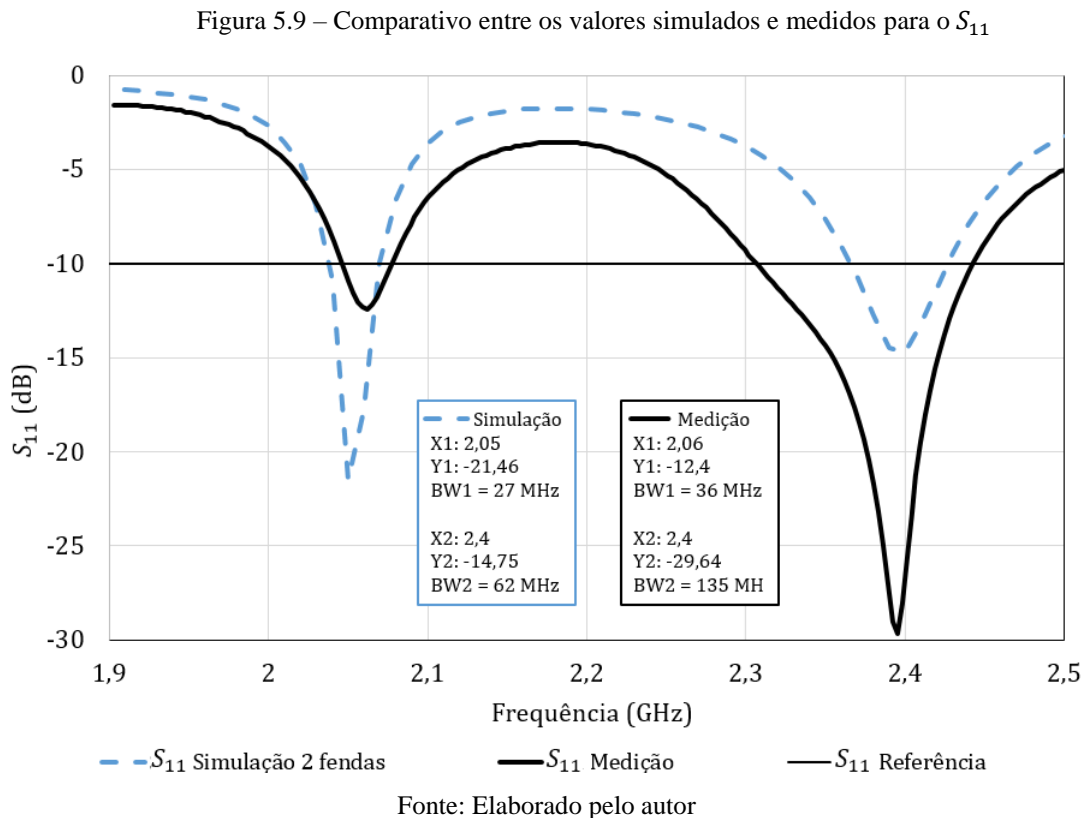
Figura 5.8 – Configuração real para medição da antena



Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura 5.8 apresenta a configuração realizada para coleta das medições da antenna com duas fendas fabricada. A seguir, serão descritos os resultados e análises dos parâmetros experimentais obtidos em relação a simulação.

Um comparativo entre os dois resultados de  $S_{11}$  (dB) (medição e simulação) da antenna com duas fendas no formato de halteres é ilustrada na Figura 5.9.



Observa-se que a curva de medição se aproxima significativamente da curva simulada, refletindo uma correspondência aproximada entre os dados experimentais e simulação.

A primeira frequência de operação revela um baixo coeficiente de reflexão na simulação, enquanto a segunda frequência de operação da antenna exibe uma medição com um coeficiente de reflexão ainda menor, e com uma largura de banda mais ampla. Considerando os aspectos de medição os resultados apresentam boa concordância entre os valores medidos e simulados.

A Tabela 7, mostra os valores medidos e simulados para a coeficiente de reflexão em função da frequência.

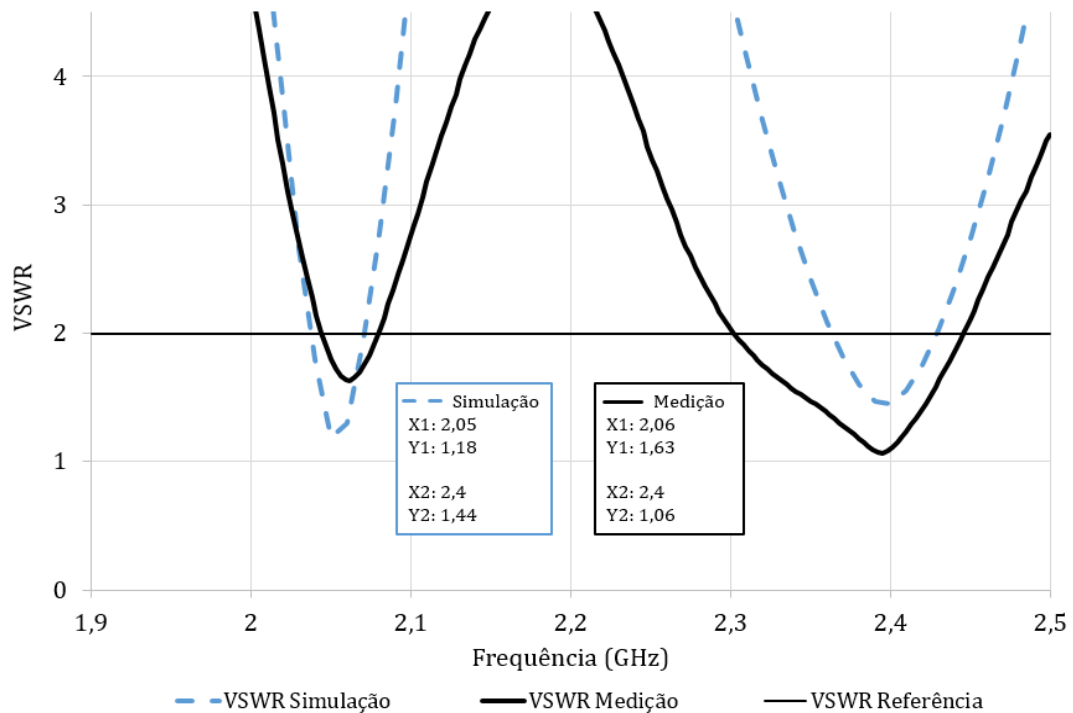
Tabela 7 – Valores simulados e medidos para o  $S_{11}$ 

		Frequência Central (GHz)	$S_{11}$ (dB)	BW (MHz)
<b>Simulado</b>	$f_1$	2,05	-21,46	27
	$f_2$	2,4	-14,75	62
<b>Medido</b>	$f_1$	2,06	-12,4	36
	$f_2$	2,4	-29,64	135

Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura 5.10 exibe uma comparação entre simulação e medição do coeficiente de onda estacionária (VSWR) para a antena com duas fendas fabricada.

Figura 5.10 – Comparativo entre os valores simulados e medidos para o VSWR



Fonte: Elaborado pelo autor

Notavelmente, fazendo a leitura do gráfico da Figura 5.10, é observado que os valores obtidos estão abaixo do limite mínimo considerado para o bom funcionamento da antena, que é VSWR igual a 2, correspondente a um coeficiente de reflexão de 10 dB. Uma boa concordância foi observada entre os resultados de simulação e medição experimental. Na Tabela 8 é descrito os valores medidos e simulados para o VSWR em função da frequência.

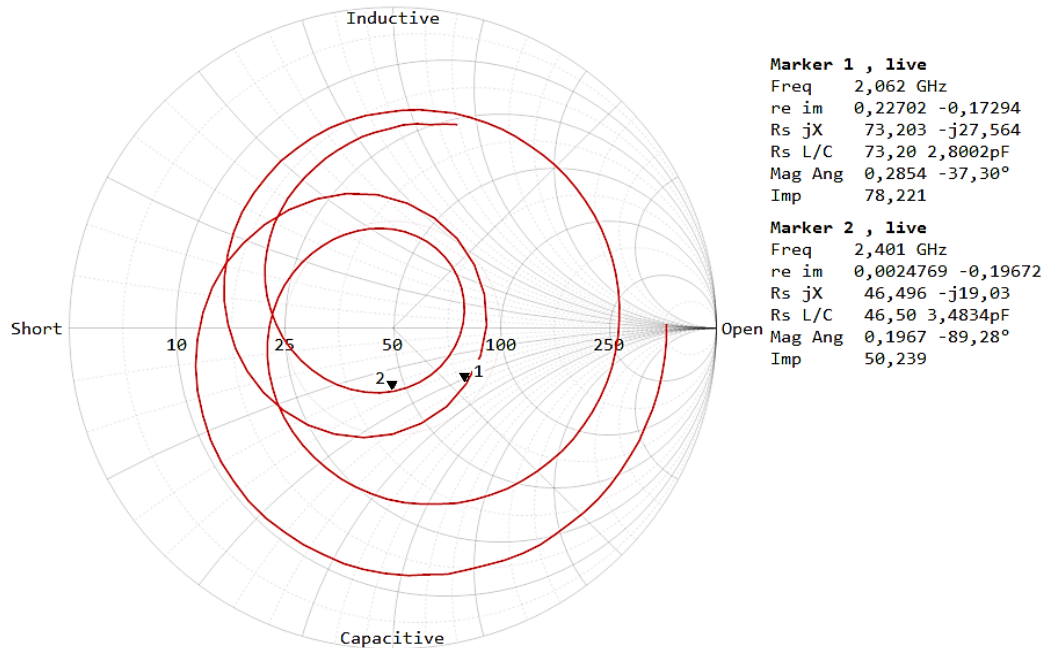
Tabela 8 – Valores simulados e medidos para o VSWR

	Frequência Central (GHz)		VSWR
<b>Simulado</b>	$f1$	2,05	1,18
	$f2$	2,4	1,44
<b>Medido</b>	$f1$	2,06	1,63
	$f2$	2,4	1,06

Fonte: Elaborado pelo autor

Na Figura 5.11, é exibida a Carta de Smith resultante das medições da antena desenvolvida mostrada na Figura 4.6, operando nas frequências de 2,06 GHz e 2,4 GHz.

Figura 5.11 – Representação da Carta de Smith (impedância sem normalização) medida experimentalmente



Fonte: Elaborado pelo autor

A antena demonstra um baixo coeficiente de reflexão, conforme foi verificado aos resultados anteriores. A análise da Carta de Smith apresentada na Figura 5.11 revela uma impedância de  $73,2 - j27,56$  ohms para a primeira frequência de 2,06 GHz e uma impedância de  $46,49 - j19,03$  ohms para a segunda frequência da antena de 2,4 GHz.

Esses valores apontam um bom casamento de impedância na segunda frequência e um resultado aceitável na primeira frequência. Essa análise, registrada na Carta de Smith, valida o desempenho da antena em relação a impedância da antena simulada.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho se concentrou em um estudo sobre antenas de microfita, com ênfase na análise dos efeitos da inserção de fendas no *patch* da antena microfita. Além disso, abrangeu o projeto de fabricação da antena de microfita com fendas, cujas medições foram realizadas utilizando o analisador vetorial de baixo custo LiteVNA-64.

Ao longo do estudo, foram examinados os principais parâmetros e características de antenas e de antenas de microfita, com o propósito de fornecer aos leitores uma compreensão geral dos elementos críticos na análise de antenas. A partir desse estudo, o projeto evoluiu para a fabricação e análise de uma antena de microfita com duas fendas. No âmbito das análises realizadas com o *software* HFSS, três cenários diferentes foram avaliados, considerando a variação na geometria do *patch* da antena com a adição de fendas. O objetivo principal foi investigar o desempenho e as alterações nos parâmetros da antena resultantes da modificação da sua geometria.

Observou-se, que a inserção de fendas em forma de halteres na geometria da antena resultou em alteração dos parâmetros como, ganho diretivo, coeficiente de reflexão, VSWR e largura de banda. Observou-se ainda, o surgimento de em uma nova frequência de operação, permitindo que a antena operar em duas faixas de frequência (*dual-band*), a de 2,06 GHz com largura de banda de 36 MHz e ganho diretivo de 5,665 dBi, e a segunda frequência de 2,4 GHz com largura de banda de 135 MHz e um ganho diretivo de 6,912 dBi, o que a torna adequada para aplicações como redes Wi-Fi e outras aplicações nessa faixa de frequência. Apesar de uma ligeira redução no ganho diretivo da antena em comparação com a versão sem fendas, conforme verificado nas simulações, o VSWR de ambos os cenários simulados e da antena fabricada permaneceu abaixo de 2, indicando uma qualidade de radiação satisfatória e uma eficiente conversão da energia transmitida em sinal irradiado.

Os resultados dessas análises, detalhados no capítulo 5 demonstram um bom grau de concordância entre as simulações e os valores medidos para os cenários avaliados. A antena com duas fendas fabricada, apresentou um bom alinhamento entre os resultados das simulações e medições experimentais para os parâmetros analisados.

Portanto, os resultados evidenciam que a introdução de fendas em formato de halteres no *patch* da antena não apenas possibilita a operação em múltiplas frequências (*dual-band*), mas também mantém um desempenho eficiente na conversão da energia transmitida em sinal irradiado. Além disso, o estudo ressalta a boa concordância entre os resultados simulados e medidos, destacando o LiteVNA-64 como uma válida escolha para estudos na área de antenas

de microfita. Além de seu baixo custo, sua portabilidade o torna uma ferramenta acessível e conveniente para pesquisas de estudantes, especialmente quando um analisador vetorial de bancada não está disponível.

### **6.1 Trabalhos futuros**

Como perspectivas para trabalho e projetos futuros, recomenda-se:

- Melhorar o casamento de impedância da antena;
- Produzir antenas com fendas com outros tipos de alimentação;
- Explorar a análise e modelagem de antenas com geometria fractal;
- Investigar antenas com fendas em um plano de terra truncado;
- Explorar análise de antena com inserção de fendas no plano de terra;
- Realizar variações na estrutura das antenas com fendas, utilizando diferentes tipos de materiais para o substrato;
- Considerar a fabricação das antenas em todos os cenários para um estudo mais abrangente, permitindo a realização de medições experimentais e a comparação dos resultados com as simulações, com foco na avaliação de seus parâmetros e desempenho.

## REFERÊNCIAS

ABDELAZIZ, Ahmed; HAMAD, Ehab KI. **Design of a compact high gain microstrip patch antenna for tri-band 5 G wireless communication.** *Frequenz*, v. 73, n. 1-2, p. 45-52, 2019.

ALIEXPRESS. **LiteVNA-64 50KHz ~ 6.3GHz.** Disponível em: <https://pt.aliexpress.com/item/1005003551867442.html>. Acesso em: 18 out. 2023.

ANDRADE, Betoven Oliveira de. **Estudo de arranjos de antenas de microfita com Patch quase-fractal para comunicações sem fio.** 2014. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia Elétrica e Computação) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2014.

ANSYS HFSS. **Software HFSS e aplicações.** Disponível em: <https://www.ansys.com/products/electronics/ansys-hfss> . Acesso em: 23 out. 2023.

ARAUJO, Jorge Antonio de Isasa. **Filtens reconfigurável usando diodo varactor para aplicações em sistemas sem fio.** 2018. Dissertação de Mestrado (Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Pernambuco, 2018.

ASTEFIT. **Modelo de Halteres.** Disponível em: <https://www.astfit.com.br/musculacao/halteres/pintados/par-de-halteres-6-kg-halter-peso-6> Acesso em: 08 nov. 2023.

Balanis, C. A. **Antenna Theory - Analysis And Design.** 3rd Ed, John Willey, 2005.

CAVALCANTE, Carlos Eduardo Chaves. **Caracterização de propriedades da cera de carnaúba para aplicação na faixa de frequência micro-ondas como substrato de antenas de microfita.** 2019. Dissertação de Mestrado (Engenharia Elétrica) - Universidade Federal Rural do Semi-Árido, 2019.

BRITO, Augusto César Rebouças de et al. **Effects of an FSS reflector on a microstrip line fed bow-tie slot antenna.** *Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications*, v. 19, p. 309-326, 2020.

COSTA, Andrécia Pereira da et al. **Implementação de uma antena ressoadora magneto-dielétrica cilíndrica baseada na matriz YIG para o controle dos modos de propagação  $HEM_{11\delta}$ ,  $TE_{01\delta}$  e  $TM_{01\delta}$ .** 2021. Tese de Doutorado (Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Campina Grande, 2021.

COSTA, Iradilson Ferreira da. **Antenas e superfícies seletivas de frequência reconfiguráveis para sistemas de comunicação sem fio.** 2009. 105 f. Dissertação (Mestrado em Automação e Sistemas; Engenharia de Computação; Telecomunicações) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2009.

DA SILVEIRA, Rhenus Victor Luna; DA SILVA, S. G. **Um estudo teórico sobre o uso das antenas de microfita.** In: III CONEDU-Congresso Nacional de Educação. 2016.

DIAS, P. A. G. **Caracterização de propriedades eletromagnéticas de substratos dielétricos e magnéticos em alta frequência.** 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Tecnologia

Espaciais/Engenharia e Gerenciamento de Sistemas Espaciais) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, São José dos Campos, 2014.

FEITOZA, Giordano Miranda. **Análise de antenas de microfita com patches circulares sobre substratos anisotrópicos usando o método dos potenciais de Hertz.** 2005. 98 f. Dissertação (Mestrado em Automação e Sistemas; Engenharia de Computação; Telecomunicações) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2005.

FRANCELINO, Isabella Grinberg. **Desenvolvimento de antenas de microfita com diferentes geometrias para o Sistema de Posicionamento Global (GPS).** 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Física) - Instituto Latino-Americano de Ciências da Vida e da Natureza (Ilacvn), 2019.

HASSANIEN, Mohamed A.; HAMAD, Ehab KI. **Compact rectangular U-shaped slot microstrip patch antenna for UWB applications.** In: IEEE Middle East Conference on Antennas and Propagation (MECAP 2010). IEEE, 2010. p. 1-4.

KUMAR, Girish; RAY, Kamala Prasan. **Broadband microstrip antennas.** 1. ed. Artech house, 2002. 246 p.

KADAM, Ameya A.; DESHMUKH, Amit A. **Compact triple band notched pentagonal shaped UWB antenna loaded with slots and parasitic resonator.** Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications, v. 20, p. 320-333, 2021.

LACERDA, Daniel Camelo; SANTOS JUNIOR, Aluisio Cesar dos. **Projeto e construção de antena de microfita para sistema móvel celular.** 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Elétrica) – Universidade de Brasília, 2008.

Medeiros, Jullo César de Oliveira. **Princípios de telecomunicações: teoria e prática / Julio César de O. Medeiros.** - 2. ed. São Paulo: Érica, 2007.

MEDEIROS, Thiago Esley de Lima. **Antenas de Micro fita sobre substrato dielétrico organizado de forma quase periódica.** 2013. 67 f. Dissertação (Mestrado em Sistemas de Comunicação e Automação) - Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, 2013.

MORAIS, José Haroldo Cavalcante de. **Estudo de antenas patches de microfita miniaturizadas em banda larga para aplicação em dispositivos móveis e portáteis.** 2011. 75 f. Dissertação (Mestrado em Automação e Sistemas; Engenharia de Computação; Telecomunicações) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2011.

MAHTAB, S. et al. **High efficiency radio frequency antennas for amplifier free quantum sensing applications.** Review of Scientific Instruments, v. 94, n. 4, 2023.

NASCIMENTO, Paula Régia Silva do; SIMÕES, Joanderson Fernandes et al. **Análise e síntese de antenas patch de microfita.** 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Técnico em Eletrônica) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte, Natal, 2017.

OLIVIERA, Elder Eldervitch Carneiro de. **Antenas de microfita com patch quase-fractal para aplicações em Redes WPAN/WLAN.** 2008. 117 f. Dissertação (Mestrado em

Automação e Sistemas; Engenharia de Computação; Telecomunicações) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2008.

PANCRACIO, Thiago Coquieri. **Projeto de uma antena yagi-uda**. 2019. Trabalho de Conclusão de curso (Engenharia de Telecomunicações) - Universidade Estadual Paulista “Júlio De Mesquita Filho”, 2019.

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. Dissertação de Mestrado (Sistema de Comunicações e Automação) - Universidade Federal Rural do Semi-Árido, 2018.

PATIL, Shilpee et al. A Wideband and Wide Axial Ratio Bandwidth Circularly Polarized Antenna Loaded with Circular Ring Slot. **Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications**, v. 21, p. 605-615, 2022.

RIBEIRO, Raul Oliveira. **Análise de antenas de microfita planares utilizando o método dos momentos e funções base com condição de borda**. 82p. 2016. Trabalho de Conclusão do Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Pampa, Campus Alegrete, Alegrete, 2016

SANTOS, Rafael Celestino dos. **Estudo da interferência de uma metasuperfície no desempenho das antenas de microfita**. 2016. 90f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica e de Computação) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2016.

SILVA, Henrique Adler Medeiros. **Análise de antenas de microfita bioinspiradas e fractais**. 2017. 117f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica e de Computação) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2017.

SILVA, José Lucas da. **Study microstrip antenna behavior with metamaterial substrate**. 2015. 80 f. Dissertação (Mestrado em Sistemas de Comunicação e Automação) - Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, 2015.

SOARES, Norton Escopelli. **Redução da interferência entre duas antenas de microfita nas faixas de 25 GHz e 26 GHz**. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2021.

SOUZA, Matheus dos Santos. **Análise de antenas de microfita com geometria quase fractal**. 2019. 46 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Eletrônica e de Telecomunicações) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2019.

TEMCOM ELECTRONIC. **What parameters can be measured with a vector network analyzer?** Disponível em: <https://www.temcom.com/what-parameters-can-be-measured-with-a-vector-network-analyzer/> Acesso em: 07 abr. 2022.

WALTER, PROFESSOR – UFSC. **A antena Yagi-Uda**. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=2GP68InrLw>. Acesso em: 30 out. 2023

ZAPI. **Antenas e refletores parabólicos.** Disponível em: <https://www.zapi.com.br/>. Acesso em: 2 nov. 2023.

## APÊNDICE A – Guia de fabricação da antena de microfita



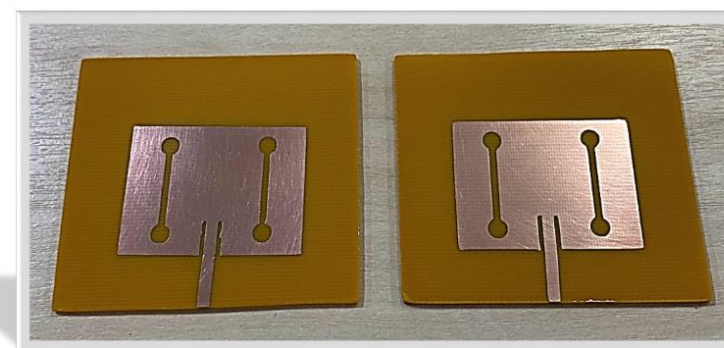
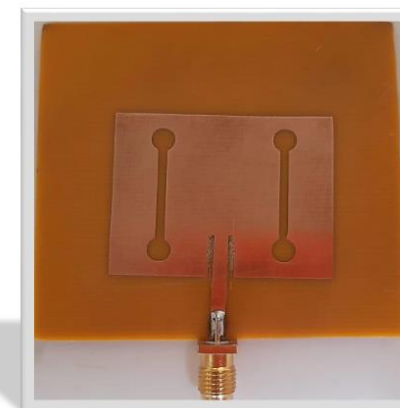
**Universidade Federal do Pará  
Campus Universitário de Tucuruí  
Faculdade de Engenharia Elétrica – FEE**

# **Guia de fabricação de antena de microfita**

Autor: Cascio Batista da Costa; Prof. Dra. Andrécia Pereira da Costa

**Aviso:** Este guia apresenta o passo a passo para fabricação artesanal de uma antena de microfita.

# Guia de confeccção de antena de microfita



# Estrutura

## 1

### Modelagem

- Modelagem gráfica
- Recorte do adesivo
- Recorte do substrato
- Fixar o adesivo no substrato

## 2

### Corrosão substrato

- Materiais para processo de corrosão química.
- Cuidados necessários

## 3

### Limpeza & Cuidados

- Limpeza e cuidados necessários.

## 4

### Solda do conector

- Solda do conector
- Finalização do processo

# 1

## Modelagem

### Modelagem gráfica

Após realizar os cálculos necessários, o passo inicial envolve a reprodução do design gráfico da antena no *software*, que pode ser o CoreIDRAW ou outros programas similares.



Imagem logo do *software* CoreIDRAW

### Recorte do adesivo

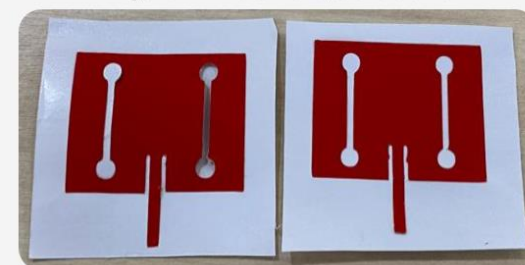
O próximo passo consiste no recorte do adesivo que definirá a forma da antena. É fundamental adotar um nível elevado de cuidados e atenção, visando assegurar um adesivo com recortes de máxima qualidade.

**Observação importante:** Para obter um recorte mais preciso do adesivo, recomenda-se ajustar uma menor velocidade da lâmina de corte.

Figura 1 - Máquina Plotter de recorte de adesivo



Figura 2 - Adesivo após recorte

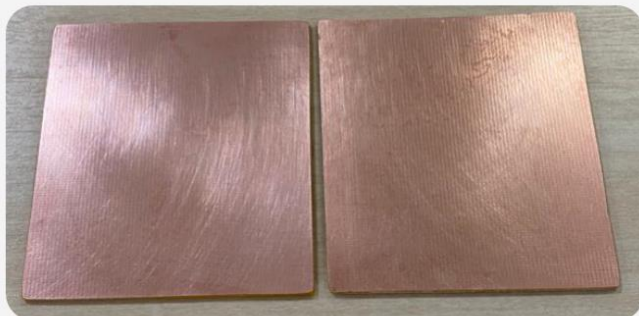


## Modelagem

### Recorte do substrato

O substrato (FR4) é cortado com o auxílio de uma lâmina de serra ou de um equipamento próprio para o corte de metal. Certifique-se de que o substrato seja cortado com precisão no tamanho previamente definido na etapa de simulação.

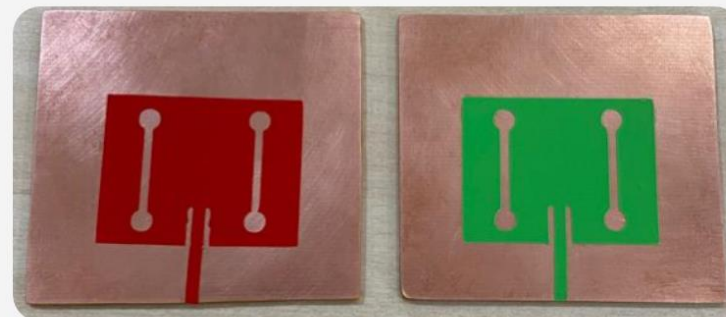
Figura 3 - Vista do substrato devidamente cortado



### Fixar o adesivo no substrato

Com o substrato já recortado, procede-se à fixação do adesivo sobre o substrato. Nesta etapa, é fundamental agir com cuidado, posicionando o adesivo de acordo com o design da antena e prestando atenção às bordas para evitar dobras indesejadas no adesivo. Certifique-se de posicionar o adesivo o mais alinhado possível.

Figura 4 - Vista do substrato com adesivo devidamente colado



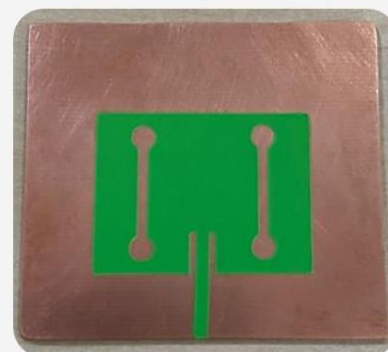
## 2

### Corrosão substrato

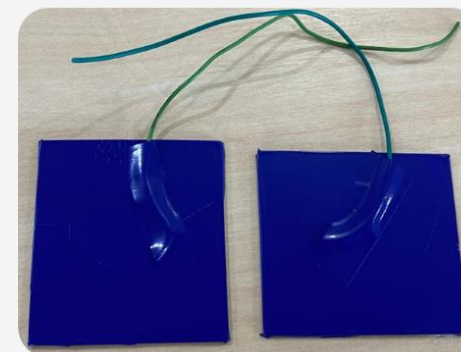
- Após a fixação do adesivo na parte frontal destinada à antena, conforme ilustrado na Figura 5 (a).
- É necessário cobrir tanto a parte inferior quanto as bordas do substrato. Um fio ou barbante é fixado acima do adesivo da parte inferior, como exemplificado na Figura 5 (b), com a finalidade de auxiliar na movimentação do patch no processo de corrosão.
- O processo de corrosão ocorre em um recipiente plástico onde é feito o uso do Percloroeto de Ferro, previamente diluído em água, no qual os *patches* serão imersos, Figura 5 (c).
- O processo de corrosão normalmente dura entre 10 e 15 minutos.

**Atenção:** No processo de corrosão, é imprescindível o uso de **luvas nas mãos e máscara facial** para proteção pessoal. O percloroeto de ferro, não deve, de forma alguma, ser descartado no meio ambiente.

Figura 5 - Preparação da antena para corrosão



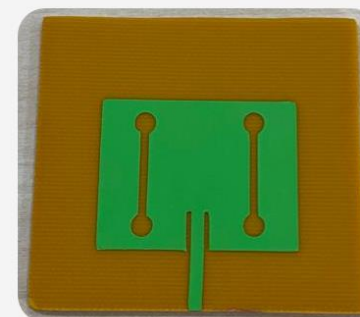
a) Vista frontal



b) Vista Inferior



c) Antena submersa em percloroeto de ferro



d) Antena fabricada

# 3

## Limpeza & Cuidados

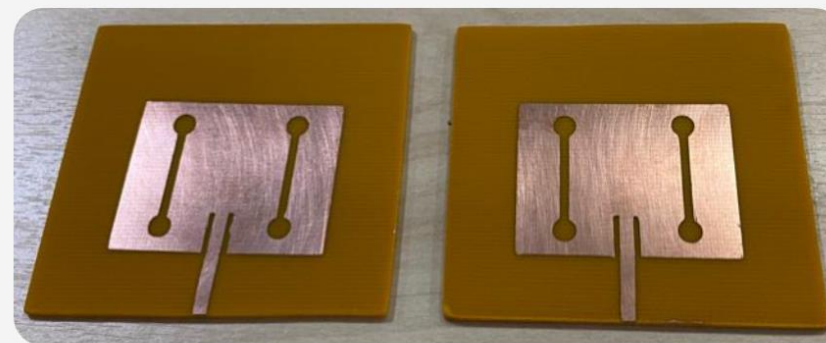
### Remoção do Adesivo

- Após a etapa de corrosão (Etapa 2), o procedimento subsequente envolve uma cuidadosa lavagem do substrato utilizando água corrente e sabão.
- Em seguida, a próxima fase compreende a remoção do adesivo previamente fixado no substrato. A Figura 6 ilustra a antena após a conclusão desse processo.

#### • Limpeza da antena

- É essencial, após a retirada do adesivo, realizar uma delicada limpeza da parte superior e inferior da antena com uma palha de aço fina, como o bombril, acompanhada do uso de sabão. O objetivo é eliminar qualquer vestígio de oxidação presente na área irradiante (cobre) da antena.

Figura 6 - Antena após remoção do adesivo e limpeza.



## 4

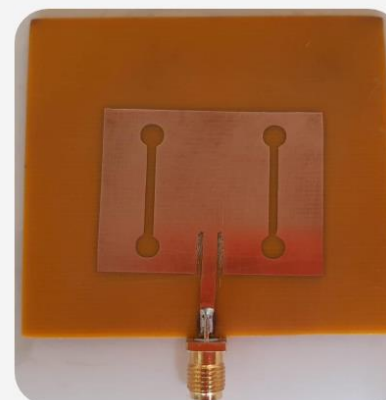
**Solda do conector****Solda do conector na linha de microfita**

- A etapa final envolve a soldagem do conector, especificamente o modelo SMA fêmea, como mostra a Figura 7 (a). É de extrema importância conduzir essa soldagem com minucioso cuidado na linha de microfita, garantindo a ausência de imperfeições, a fim de evitar um maior descasamento de impedância de entrada.
- A soldagem é realizada com o conector, com um pino posicionado para a parte superior e dois pinos na parte inferior, conforme evidenciado na Figura 7 (b) e (c).

Figura 7 - Detalhe da soldagem dos conectores



a) Conector SMA fêmea



b) Vista frontal antena com conector soldado



c) Vista inferior com conector soldado

