



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

LUIS ALEXANDRE BORGES TELES

**IMPACTO DE FENDAS EM ARCO SIMPLES E DUPLA NO
PARÂMETRO S_{11} DE ANTENAS *PATCH* CIRCULARES**

TUCURUÍ

2026

LUIS ALEXANDRE BORGES TELES

**IMPACTO DE FENDAS EM ARCO SIMPLES E DUPLA NO
PARÂMETRO S_{11} DE ANTENAS *PATCH* CIRCULARES**

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

Orientador:
Profa. Dra. Andrécia Pereira da Costa.

Coorientador: Prof. Dr. Ianes Barbosa Gré-
cia Coutinho.

TUCURUÍ

2026

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

T269i Teles, Luis Alexandre Borges.
IMPACTO DE FENDAS EM ARCO SIMPLES E DUPLA NO
PARÂMETRO S11 DE ANTENAS PATCH CIRCULARES / Luis
Alexandre Borges Teles. — 2026.
54 f. : il. color.

Orientador(a): Prof^ª. Dra. Andrécia Pereira Costa
Coorientador(a): Prof. Dr. Ianes Barbosa Grécia Coutinho
Trabalho de Curso (Graduação) - Universidade Federal do Pará,
Campus Universitário de Tucuruí, Faculdade de Engenharia
Elétrica, Tucuruí, 2026.

1. Antena patch circular. 2. fendas em arco. 3. microfita. 4.
multibanda. 5. S11. I. Título.

CDD 621.3

LUIS ALEXANDRE BORGES TELES

**IMPACTO DE FENDAS EM ARCO SIMPLES E DUPLA NO
PARÂMETRO S_{11} DE ANTENAS *PATCH* CIRCULARES**

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

Data de aprovação: 08/07/2026

Banca Examinadora:

Profª. Dra. Andrécia Pereira da Costa
Orientadora - FEE/CAMTUC/UFPA

**Prof. Dr. Ianes Barbosa Grécia
Coutinho**
Coorientador Externo - Pesquisador
Colaborador

**Prof. Dr. Washington Cesar Braga de
Sousa**
Avaliador Interno - ITEC/Belém/UFPA

Prof. Dr. Alfrêdo Gomes Neto
Avaliador Externo - João Pessoa/IFPB

TUCURUÍ

2026



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

TÍTULO:

IMPACTO DE FENDAS EM ARCO SIMPLES E DUPLA NO PARÂMETRO S_{11} DE ANTENAS PATCH CIRCULARES

DISCENTE: LUIS ALEXANDRE BORGES TELES

MATRÍCULA: 201833940005

#	BANCA EXAMINADORA	CONDIÇÃO
1	Profª. Dra. Andrécia Pereira da Costa, FEE/CAMTUC/UFPa	Orientador
2	Prof. Dr. Ianes Barbosa Grécia Coutinho, Pesquisador Colaborador	Coorientador
3	Prof. Dr. Washington César Braga de Sousa, ITEC/Belém/UFPa	Membro
4	Prof. Dr. Alfrêdo Gomes Neto, João Pessoa/IFPB	Membro

Data da Defesa: 08/07/2026

Hora Início: 09:00h

Hora Término: 09:38h

Trabalho Escrito (0 a 10 pontos por critério)	Examinador 1	Examinador 2	Examinador 3	Examinador 4
Formatação	9,50	10,00	10,00	10,00
Linguagem (gramática e semântica)	9,50	10,00	9,50	10,00
Conteúdo técnico	9,50	9,50	10,00	9,00

Defesa Oral (0 a 10 pontos por critério)	Examinador 1	Examinador 2	Examinador 3	Examinador 4
Sequência lógica de apresentação	10,00	10,00	10,00	10,00
Administração do tempo	10,00	10,00	10,00	10,00
Expressão oral	9,50	9,00	9,00	9,50
Domínio do tema	10,00	9,50	9,50	9,50

Média por examinador	9,71	9,71	9,71	9,71
Média Final	9,71			
Conceito Final	EXCELENTE			

Tucuruí-PA, 15/07/2026.

Documento assinado digitalmente
gov.br ANDRECIA PEREIRA DA COSTA
Data: 15/07/2026 09:32:59-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Orientador

Documento assinado digitalmente
gov.br IANES BARBOSA GRECIA COUTINHO
Data: 15/07/2026 09:44:20-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Coorientador

Documento assinado digitalmente
gov.br ALFREDO GOMES NETO
Data: 15/07/2026 10:32:31-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Membro

Documento assinado digitalmente
gov.br WASHINGTON CESAR BRAGA DE SOUSA
Data: 16/07/2026 07:37:14-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Membro

Dedico este trabalho aos meus pais, Luis Lobato Teles e Tereza Pinto Borges, minha eterna gratidão por cada gesto de amor e sacrifício. Vocês me ensinaram a ser forte, a acreditar nos meus sonhos e a nunca desistir. A paciência e dedicação de vocês são a base de tudo que conquistei. Este trabalho é também de vocês, porque cada vitória minha carrega o esforço e o carinho que sempre me deram. Amo vocês profundamente.

À Mariza Tavares e ao Lucas Moisés, exemplos vivos de resiliência e superação. A força de vocês me inspirou profundamente e foi essencial para que eu tivesse coragem de continuar. Este trabalho também é reflexo da inspiração que recebi de suas histórias e da luz que vocês representam.

Aos amigos Diogo Coelho Leite, Jorge Ronaldo Monteles e Ronaldo Santos Monteles, pela amizade verdadeira, pelas conversas que me fizeram crescer e pelo incentivo nos momentos mais desafiadores.

A todos vocês, minha eterna admiração e reconhecimento.

AGRADECIMENTOS

A Deus, origem de toda sabedoria e luz que guia os passos incertos, agradeço com o coração pleno. Foi em Seu silêncio que encontrei força e, em Suas respostas invisíveis, descobri direção. Nos dias em que o cansaço pesava mais que a esperança, foi Ele quem me sustentou. Este trabalho é fruto não apenas de esforço humano, mas também da fé que me manteve firme quando tudo parecia desvanecer.

À minha orientadora, Andrécia Pereira da Costa, registro minha sincera gratidão pela orientação competente e dedicada ao longo desta graduação. Gratidão por acreditar em mim e me incentivar a seguir adiante, mesmo nos momentos de dúvida. Sua paciência, rigor científico e incentivo constante foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho e para minha formação acadêmica. Sua contribuição ultrapassa os limites deste projeto, pois me abriu caminhos para a pesquisa e consolidou em mim o compromisso com a ciência.

À Universidade Federal do Pará (UFPA), pela estrutura, pelo conhecimento e pelas oportunidades oferecidas durante minha formação acadêmica.

Expresso minha sincera gratidão aos amigos Diogo Coelho Leite, Edivam Lobato Gomes, Ivanildo dos Santos Bento, Leandro Miranda Cota e Luiz Carlos Gomes Costa, que estiveram ao meu lado nos momentos mais desafiadores, oferecendo apoio, ideias e motivação.

Agradeço também à Triade Agência de *Marketing*, pela colaboração e pelo suporte técnico que contribuíram diretamente para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos colegas do Laboratório de Fabricação Digital (FabLab) e do Laboratório de Síntese e Manutenção de Dispositivos (SMDLab) — Elielson Vieira Sales, Gabriel Fernandes de Brito, Igor Emanuel, Jessica Souza, João Victor Farias e Melliany Gama da Silva — agradeço pela colaboração e pelo apoio constante durante esta jornada. Em nome do FabLab, expresso minha gratidão ao professor Rafael Suzuke Bayma, e em nome do SMDLab, ao professor André Cruz, pela disponibilidade das máquinas e materiais de consumo que foram essenciais para o desenvolvimento deste trabalho. Sem o suporte técnico e estrutural oferecido por ambos os laboratórios, este projeto não teria alcançado sua forma final.

À banca examinadora, composta pela Profa. Dra. Andrécia Pereira da Costa, Prof. Dr. Ianes Barbosa Grécia Coutinho, Prof. Dr. Washington Cesar Braga de Sousa e Prof. Dr. Alfrêdo Gomes Neto, registro minha sincera gratidão pela disponibilidade, pelas valiosas contribuições e pelo olhar crítico que enriqueceram este trabalho. A presença de cada um nesta etapa representa não apenas rigor acadêmico, mas também incentivo e

inspiração para seguir aprimorando minha trajetória científica.

A todos que, de alguma forma, fizeram parte desta jornada, meu muito obrigado.

"O conhecimento não é um troféu para exibir, mas uma ferramenta para servir. Quem aprende e não compartilha, apenas decora o mundo sem transformá-lo."
(Luis Alexandre Borges Teles).

RESUMO

Este trabalho apresenta a análise do impacto de fendas em arco simples e dupla no parâmetro S_{11} de antenas *patch* circulares. A antena de referência foi dimensionada para operar no modo TM_{11} na frequência de 2,4 GHz, com raio $R \approx 16,98$ mm, sobre substrato FR-4 com permissividade relativa $\varepsilon_r = 4,4$, tangente de perdas $\tan \delta \approx 0,02$ e espessura $h = 1,5$ mm. A alimentação foi implementada por meio de um transformador de quarto de comprimento de onda ($\lambda/4$), composto por linha principal de largura $W_{1D} = 5$ mm e seção estreita de $W_{1H} = 1,5$ mm, com comprimento total $L_1 = 31,17$ mm. Quatro configurações foram simuladas no *software* Ansys HFSS: sem fenda (referência), com fenda em arco à esquerda, com fenda em arco à direita e com duas fendas em arco. As fendas foram modeladas como arcos com comprimento $L_c = 16,59$ mm, largura $W_c = 1,73$ mm, raio $R_s = R_d = 13,63$ mm e ângulo central $\theta = 60^\circ$. A configuração da antena base apresentou ressonâncias em 2,42 GHz ($S_{11} = -37$ dB) e 4,84 GHz ($S_{11} = -14$ dB). A configuração com fenda à esquerda habilitou três bandas de operação: 2,38 GHz, 4,62 GHz e 5,41 GHz. A configuração com fenda à direita apresentou respostas similares à medição feita com a fenda do lado esquerdo. A configuração com duas fendas apresentou comportamento multibanda com ressonâncias em 2,12 GHz ($S_{11} = -16,73$ dB) e 5,05 GHz ($S_{11} = -30,84$ dB). O protótipo da configuração com duas fendas foi fabricado no Laboratório de Fabricação Digital (FABLAB) do Campus Universitário de Tucuruí (CAMTUC), da Universidade Federal do Pará (UFPA), por corte CNC a laser, e caracterizado experimentalmente no Laboratório de Síntese e Manutenção de Dispositivos (SMDLab) com o Analisador Vetorial de Redes (VNA) portátil, modelo LiteVNA-64, calibrado pela técnica SOL. Os resultados experimentais confirmaram o comportamento multibanda, com ressonâncias em 2,01 GHz ($S_{11} = -15,03$ dB) e 5,13 GHz ($S_{11} = -18,86$ dB), VSWR de 1,43 e 1,25, e larguras de banda de 50 MHz e 120 MHz, respectivamente. Os desvios entre simulação e medição foram de 5,19% e 1,58%. A boa concordância entre os resultados valida a metodologia adotada e demonstra que fendas em arco constituem alternativa eficaz para o projeto de antenas compactas e multibanda com potencial de aplicação em sistemas Wi-Fi e IoT.

Palavras-chave: Antena *patch* circular; fendas em arco; microfita; multibanda; S_{11} ; HFSS; LiteVNA-64.

ABSTRACT

This work presents an analysis of the impact of single and double arc slots on the S_{11} parameter of circular patch microstrip antennas. The reference antenna was dimensioned to operate in the TM_{11} mode at 2.4 GHz, with radius $R \approx 16.98$ mm, on an FR-4 substrate with relative permittivity $\epsilon_r = 4.4$, loss tangent $\tan \delta \approx 0.02$ and thickness $h = 1.5$ mm. The feeding was implemented using a quarter-wavelength ($\lambda/4$) transformer composed of a main line with width $W_{1D} = 5$ mm, a narrow section of $W_{1H} = 1.5$ mm and total length $L_1 = 31.17$ mm. Four configurations were simulated in Ansys HFSS: without slot (reference), with a left arc slot, with a right arc slot and with two arc slots. The slots were modeled as arcs with length $L_c = 16.59$ mm, width $W_c = 1.73$ mm, radius $R_s = R_d = 13.63$ mm and central angle $\theta = 60^\circ$. The reference configuration resonated at 2.42 GHz ($S_{11} = -37$ dB) and 4.84 GHz ($S_{11} = -14$ dB). The left-slot configuration enabled three operating bands: 2.38 GHz, 4.62 GHz and 5.41 GHz. The configuration with the slot on the right exhibited responses similar to those measured with the slot positioned on the left. The dual-slot configuration showed the best multiband performance, with resonances at 2.12 GHz ($S_{11} = -16.73$ dB) and 5.05 GHz ($S_{11} = -30.84$ dB). The dual-slot prototype was fabricated at the Digital Fabrication Laboratory (FABLAB) of the University Campus of Tucuruí (CAMTUC), Federal University of Pará (UFPA), using CNC laser cutting, and experimentally characterized at the Device Synthesis and Maintenance Laboratory (SMDLab) with the portable LiteVNA-64 Vector Network Analyzer (VNA), calibrated using the SOL technique. Experimental results confirmed the multiband behavior with resonances at 2.01 GHz ($S_{11} = -15.03$ dB) and 5.13 GHz ($S_{11} = -18.86$ dB), VSWR of 1.43 and 1.25, and bandwidths of 50 MHz and 120 MHz, respectively. Deviations between simulation and measurement were 5.19% and 1.58%. The good agreement validates the adopted methodology and demonstrates that arc slots are an effective alternative for designing compact multiband antennas suitable for Wi-Fi and IoT applications.

Keywords: Circular patch antenna; arc slots; microstrip; multiband; S_{11} ; HFSS; LiteVNA-64.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Modelo de antena <i>patch</i>	25
Figura 2 – Formatos tipicamente usados em antenas <i>patch</i>	26
Figura 3 – Método de alimentação por linha de microfita.	28
Figura 4 – Formas típicas de <i>patch</i> de microfita.	32
Figura 5 – Configurações analisadas no estudo.	34
Figura 6 – Configuração proposta com indicação dos parâmetros geométricos e seus valores médios adotados. (a) detalhes da antena completa; (b) detalhe do <i>patch</i>	36
Figura 7 – modelagem de teste no <i>software</i> HFSS da ANSYS.	37
Figura 8 – Etapas de fabricação da antena: (a) máquina CNC a laser Visutec VS6040; (b) preparação do material adesivo por corte em CNC a laser; (c) remoção do adesivo nas regiões de corrosão; (d) ataque químico da placa; (e) antena fabricada; (f) antena fabricada com conector SMA fixado.	38
Figura 9 – Caracterização do protótipo fabricado: (a) vista inferior, evidenciando o plano de terra e o conector SMA; (b) vista superior com medição da largura; (c) medição do comprimento total da antena.	39
Figura 10 – Montagem experimental empregada para a realização das medições com o LiteVNA-64.	40
Figura 11 – Resposta em frequência (S_{11}) da antena para todas as configurações analisadas (simulação).	41
Figura 12 – Distribuição de corrente superficial no <i>patch</i> das antenas projetadas: (a) antena sem fenda; (b) antena com fenda lateral esquerda; (c) antena com fenda lateral direita; (d) antena com fenda dupla.	43
Figura 13 – Comparação entre os resultados simulados e medidos do parâmetro S_{11} para a antena com duas fendas.	44
Figura 14 – VSWR em função da frequência da antena com duas fendas — simulação e medição.	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	–	Propriedades elétricas de substratos comuns para antenas de microfitas.	27
Tabela 2	–	Descrição do material da antena projetada.	32
Tabela 3	–	Descrição da linha de microfitas da antena proposta.	33
Tabela 4	–	Parâmetros Geométricos das Fendas em Arco.	34
Tabela 5	–	Parâmetros físicos da antena projetada.	35
Tabela 6	–	Parâmetros de desempenho simulados das quatro configurações da antena.	44
Tabela 7	–	Comparação entre resultados simulados e medidos — antena com duas fendas.	47
Tabela 8	–	Comparação entre resultados do desvio de ressonâncias simulados e medidos — antena com duas fendas.	47

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

dB	<i>Decibel</i>
dB _i	<i>Decibel isotrópico</i>
CAMTUC	Campus Universitário de Tucuruí
CNC	<i>Computer Numerical Control</i> (Controle numérico computadorizado)
FABLAB	Laboratório de Fabricação Digital
FDTD	<i>Finite Difference Time Domain</i> (Método das diferenças finitas no domínio do tempo)
FEM	<i>Finite Element Method</i> (Método dos elementos finitos)
FR-4	<i>Flame Retardant 4</i> (Material composto de fibra de vidro com resina epóxi)
GHz	<i>Gigahertz</i>
HFSS	<i>High Frequency Structure Simulator</i>
IoT	<i>Internet of Things</i> (Internet das coisas)
ISM	<i>Industrial, Scientific and Medical</i> (Faixa de frequências de uso industrial, científico e médico)
MHz	<i>Megahertz</i>
MoM	<i>Method of Moments</i> (Método dos momentos)
PCB	<i>Printed Circuit Board</i> (Placa de circuito impresso)
SBMO	Simpósio Brasileiro de Micro-ondas e Optoeletrônica
SMA	<i>SubMiniature version A</i> (Conector subminiatura versão A)
SMDLab	Laboratório de Síntese e Manutenção de Dispositivos
SOL	<i>Short-Open-Load</i> (Método de calibração de analisador de redes)
TCC	Trabalho de Conclusão de Curso
TM	<i>Transverse Magnetic</i> (Modo de propagação com campo magnético transversal)

UFPA	Universidade Federal do Pará
VNA	<i>Vector Network Analyzer</i> (Analisador de rede vetorial)
VSWR	<i>Voltage Standing Wave Ratio</i> (Razão de onda estacionária de tensão)
Wi-Fi	<i>Wireless Fidelity</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

a	Raio físico do <i>patch</i> circular (m);
a_e	Raio efetivo do <i>patch</i> circular (m);
c	Velocidade da luz no vácuo (3×10^8 m/s);
D_c	Separação entre as fendas em arco (m);
f_{11}	Frequência de ressonância do modo TM_{11} (Hz);
f_0	Frequência de ressonância (Hz);
h	Espessura do substrato dielétrico (m);
L	Comprimento físico do <i>patch</i> retangular (m);
L_{ef}	Comprimento efetivo do <i>patch</i> (m);
L_1	Comprimento total da linha de alimentação (m);
L_c	Comprimento do arco da fenda (m);
L_g	Comprimento do substrato/plano de terra (m);
R_d	Raio do arco da fenda direita (m);
R_s	Raio do arco da fenda esquerda (m);
S_{11}	Coefficiente de reflexão na porta de alimentação (dB);
W_c	Largura da fenda em arco (m);
W_g	Largura do substrato/plano de terra (m);
X'_{11}	Primeira raiz da derivada da função de Bessel de primeira ordem ($X'_{11} = 1,8412$);
W	Largura do <i>patch</i> retangular (m);
W_f	Largura da linha de alimentação (m);
X'_{mn}	n -ésima raiz da derivada da função de Bessel de ordem m ;
ΔL	Extensão de borda do <i>patch</i> (m);
ε_r	Constante dielétrica relativa do substrato;

ε_{re}	Constante dielétrica efetiva;
θ_d	Ângulo central do arco da fenda direita (graus);
θ_s	Ângulo central do arco da fenda esquerda (graus);
$\tan \delta$	Tangente de perdas dielétricas.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
1.1	Justificativa	22
1.2	Objetivos	22
1.2.1	Objetivo geral	22
1.2.2	Objetivos específicos	22
1.3	Estrutura Trabalho de Conclusão de Curso (TCC)	23
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	24
2.1	Antenas de Microfita: Constituição e Histórico	24
2.1.1	Vantagens e Limitações	25
2.2	Elemento Irradiante: Geometria e aplicações	25
2.3	Substratos Dielétricos	26
2.4	Métodos de Alimentação	27
2.4.1	Alimentação por Linha de Microfita com Transformador $\lambda/4$	27
2.4.2	Alimentação por Cabo Coaxial	28
2.4.3	Acoplamento por Abertura e por Proximidade	28
2.5	Modelos de Análise para <i>Patches</i> Circulares	28
2.5.1	Modelo de Cavidade Ressonante	28
2.5.2	Método dos Elementos Finitos (FEM) e o <i>Software</i> HFSS da ANSYS	29
2.6	Parâmetros de Desempenho	29
2.6.1	Coefficiente de Reflexão S_{11}	29
2.6.2	VSWR (<i>Voltage Standing Wave Ratio</i>)	30
2.6.3	Largura de Banda	30
2.6.4	Ganho e Diagrama de Irradiação	30
2.7	Fendas em Antenas <i>Patch</i>: Fundamentos e Estado da Arte	30
3	METODOLOGIA E DESENVOLVIMENTO	32
3.1	Dimensionamento Analítico da Antena de Referência	32
3.2	Estrutura de Alimentação	33
3.3	Configurações Geométricas Investigadas	33
3.3.1	Parâmetros Geométricos das Fendas em Arco	34
3.4	Implementação no <i>Software</i> HFSS	36
3.5	Fabricação do Protótipo	37
3.6	Procedimento de Medição Experimental	39
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	41

4.1	Análise Comparativa das Quatro Configurações Simuladas . . .	41
4.1.1	Configuração da antena básica (Sem Fenda)	41
4.1.2	Configuração com Fenda à Esquerda	42
4.1.3	Configuração com Fenda à Direita	42
4.1.4	Configuração com Duas Fendas (Dupla)	43
4.2	Resultados Experimentais e Comparação com a Simulação . . .	44
4.2.1	Coefficiente de Reflexão S_{11}	44
4.2.2	Análise do VSWR	45
4.2.3	Discussão das Discrepâncias entre Simulação e Medição	45
4.3	Síntese dos Resultados	47
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	48
5.1	Principais Contribuições	49
5.2	Comparação com a Literatura	49
5.3	Limitações do Trabalho	50
5.4	Perspectivas de Trabalhos Futuros	50
	REFERÊNCIAS	52

1 INTRODUÇÃO

O crescimento exponencial dos sistemas de comunicação sem fio nas últimas décadas tem impulsionado uma demanda crescente por antenas compactas, de baixo custo e com capacidade de operação em múltiplas faixas de frequência. Nesse contexto, as antenas de microfita — também denominadas *patch antennas* — consolidaram-se como uma das soluções mais empregadas na engenharia de micro-ondas, em razão de suas características de baixo perfil, peso reduzido, facilidade de integração com circuitos impressos e custo de fabricação acessível (BALANIS, 2016; KUMAR; RAY, 2003).

Concebidas originalmente por Deschamps nos Estados Unidos em 1953 e, de forma independente, por Gutton e Baissinot na França em 1955, as antenas de microfita somente ganharam aplicação prática na década de 1970, quando Howell e Munson demonstraram suas primeiras implementações funcionais (HOWELL, 1975; MUNSON, 1974). Desde então, o interesse científico e tecnológico por esse tipo de antena cresceu de forma expressiva, impulsionado especialmente pela expansão das redes de comunicação móvel, dos Sistemas de Posicionamento Global (GPS), das Redes Locais Sem Fio (WLAN) e, mais recentemente, pela proliferação de dispositivos conectados à Internet das Coisas (IoT), (JANARTHANAN et al., 2024; TIANG et al., 2024; WONG, 2002).

A estrutura básica de uma antena de microfita consiste em três elementos: um elemento irradiante condutor (*patch*) impresso sobre a face superior de um substrato dielétrico, o próprio substrato que fornece suporte mecânico e propriedades elétricas específicas, e um plano de terra condutor na face inferior (BALANIS, 2016). O mecanismo de radiação surge das descontinuidades nas bordas da linha de transmissão ressonante formada pelo conjunto *patch*-substrato-plano de terra, e a frequência de operação é determinada pelas dimensões do *patch* e pelas propriedades do substrato (KUMAR; RAY, 2003; ZÜRCHER; GARDIOL, 1995).

Entre as geometrias de *patch* disponíveis — retangular, quadrada, triangular, elíptica e circular, entre outras — a geometria circular tem recebido atenção crescente na literatura científica. Essa preferência se justifica pela simetria azimutal no diagrama de irradiação, pela maior facilidade de integração com estruturas cilíndricas, pelas características favoráveis para a obtenção de polarização circular e pela capacidade de suportar múltiplos modos ressonantes dentro de uma estrutura compacta (BALANIS, 2016; BIRWAL; PATEL; SINGH, 2024). Estudos como os de Sousa et al. (2025) demonstram que antenas *patch* circulares apresentam desempenho competitivo em sistemas de comunicação modernos, especialmente quando combinadas com técnicas adequadas de adaptação de impedância. As antenas circulares têm sido empregadas em aplicações que incluem sistemas GPS, radares de abertura sintética, satélites de baixa órbita (LEO), dispositivos de Identificação

por Radiofrequência (RFID) e comunicações veiculares (BALANIS, 2016; TIANG et al., 2024).

A importância das antenas *patch* circulares em sistemas modernos de comunicação é amplamente reconhecida. Em sistemas de comunicação 5G, por exemplo, onde a operação simultânea em múltiplas bandas de frequência é essencial, as antenas *patch* circulares com modificações estruturais têm se destacado como candidatas viáveis para integração em dispositivos portáteis e estações base (JANARTHANAN et al., 2024; TIANG et al., 2024). Em sistemas de radares e sensoriamento remoto, a simetria de sua geometria permite o desenvolvimento de antenas com polarização circular pura, característica fundamental para a supressão de ecos de chuva e para a compatibilidade com alvos em rotação (BALANIS, 2016).

Apesar de suas inúmeras vantagens, as antenas *patch* convencionais enfrentam limitações inerentes à sua topologia, entre as quais se destacam a estreita largura de banda — tipicamente de 1% a 5% para substratos convencionais — e a dificuldade de operação simultânea em múltiplas bandas de frequência (BALANIS, 2016; KUMAR; RAY, 2003). Tais restrições tornam-se particularmente críticas em aplicações modernas que exigem compatibilidade com padrões como 2,4 GHz (Wi-Fi) e 5 GHz (IEEE 802.11b/g/n e IEEE 802.11a/n/ac), sistemas de comunicação celular 4G e 5G, dispositivos *Bluetooth* e redes de sensores IoT (JANARTHANAN et al., 2024; BHATT; MAKWANA, 2024).

Para superar essas limitações, a literatura tem investigado extensamente técnicas de modificação estrutural do elemento irradiante. Dentre as estratégias mais amplamente estudadas, destacam-se: o uso de substratos de baixa permissividade e maior espessura (BALANIS, 2016); configurações multicamadas com *patches* empilhados (ZÜRCHER; GARDIOL, 1995); redes de adaptação de impedância equivalentes (KUMAR; RAY, 2003); e, especialmente, a inserção de fendas (*slots*) no *patch* (TEWARY et al., 2023; KASHYAP et al., 2022; BHATT; MAKWANA, 2024). Esta última técnica se destaca por sua simplicidade construtiva — não exige camadas adicionais nem aumenta as dimensões físicas do substrato — e pelo impacto significativo que provoca no comportamento eletromagnético da antena (BIRWAL; PATEL; SINGH, 2024).

O papel das fendas na melhoria do parâmetro S_{11} e da largura de banda de antenas de microfita tem sido amplamente documentado. As fendas perturbam a distribuição de corrente superficial no *patch*, forçando-a a percorrer caminhos mais longos ao redor das aberturas, o que efetivamente aumenta o comprimento elétrico da antena (KASHYAP et al., 2022). Esse efeito provoca o deslocamento das frequências de ressonância e o surgimento de novos modos de operação, habilitando o comportamento multibanda sem necessidade de aumentar as dimensões físicas do elemento iradiante (BHATT; MAKWANA, 2024; TEWARY et al., 2023). Bhatt e Makwana (2024) demonstraram que fendas retangulares em *patches* circulares permitem operação simultânea nas bandas de 5G e WLAN/WiMAX

com S_{11} inferior a -10 dB. Birwal, Patel e Singh (2024) investigaram fendas circulares em *patches* circulares para aplicações em leitores RFID na faixa de 2,45 GHz, obtendo polarização circular e boa estabilidade do diagrama de irradiação. Kashyap et al. (2022) verificaram que fendas associadas a nanofilmes metálicos podem elevar simultaneamente o ganho e a largura de banda de antenas de microfita para aplicações WLAN. Tewary et al. (2023) combinaram estruturas de Superfície Seletiva em Frequência (FSS) com fendas para ampliar o ganho em banda larga.

No que diz respeito às pesquisas sobre modificações estruturais em antenas para otimização de desempenho, além da inserção de fendas, investigam-se também geometrias fractais (KUMAR; RAY, 2003), antenas reconfiguráveis com componentes ativos (TIANG et al., 2024) e superfícies de alta impedância (TEWARY et al., 2023). A convergência dessas abordagens aponta para uma tendência clara na literatura: a busca por estruturas compactas, multifuncionais e de baixo custo, capazes de atender às crescentes demandas dos sistemas de comunicação sem fio de próxima geração (JANARTHANAN et al., 2024).

Apesar dos avanços descritos, ainda há uma lacuna na literatura no que se refere à análise sistemática do impacto de fendas especificamente em arco — simples e dupla — em *patches* circulares, considerando diferentes posições e orientações da fenda em relação ao ponto de alimentação. O presente trabalho preenche essa lacuna ao analisar, de forma estruturada e com validação experimental, o impacto da inserção de fendas em arco nas configurações simples (à esquerda e à direita) e dupla — no parâmetro S_{11} de antenas *patch* circulares projetadas para a faixa de 2,4 GHz.

A antena foi estruturada sobre substrato FR-4 ($\epsilon_r = 4,4$, $h = 1,5$ mm), alimentada por um transformador de quarto de comprimento de onda ($\lambda/4$) e simulada no Simulador de Estruturas de Alta Frequência (HFSS, *High Frequency Structure Simulator*) da ANSYS (ANSYS, 2026). O protótipo da configuração com duas fendas foi fabricado no Laboratório de Fabricação Digital (FABLAB) do Campus Universitário de Tucuruí (CAMTUC), da Universidade Federal do Pará (UFPA), por meio de corte CNC a laser, e caracterizado experimentalmente no Laboratório de Síntese e Manutenção de Dispositivos (SMDlab), utilizando o analisador vetorial de redes portátil LiteVNA-64.

As aplicações práticas das antenas desenvolvidas abrangem sistemas Wi-Fi nas faixas de 2,4 GHz e 5 GHz, redes de comunicação de curto alcance (*Bluetooth*), comunicações em veículos autônomos, sistemas de radiolocalização, redes de sensores IoT, dispositivos de comunicação vestíveis (*wearables*) e estações base de comunicação celular (TIANG et al., 2024; JANARTHANAN et al., 2024; BHATT; MAKWANA, 2024). A topologia multibanda obtida com duas fendas em arco é especialmente relevante para aplicações que demandam compatibilidade simultânea com múltiplos padrões de comunicação sem fio, reduzindo a necessidade de antenas separadas para cada faixa de operação e contribuindo para a miniaturização dos dispositivos.

1.1 Justificativa

A demanda crescente por dispositivos de comunicação sem fio multibanda e compactos justifica a investigação de técnicas de modificação estrutural em antenas de microfita (JANARTHANAN et al., 2024; TIANG et al., 2024). A inserção de fendas em arco em *patches* circulares representa uma abordagem ainda pouco explorada de forma sistemática na literatura, especialmente no que se refere à influência da posição e orientação da fenda em relação ao ponto de alimentação. A compreensão desse impacto é fundamental para o desenvolvimento de antenas multibanda compactas e eficientes, alinhadas às demandas dos sistemas de comunicação sem fio modernos.

Do ponto de vista prático, o uso do substrato FR-4 garante baixo custo e ampla disponibilidade, e o processo de fabricação por CNC a laser empregado no FABLAB/-CAMTUC oferece maior precisão dimensional em relação à corrosão química artesanal convencional, tornando o protótipo mais fiel ao modelo simulado. O emprego do LiteVNA-64 para a caracterização experimental demonstra a viabilidade de realizar medições de qualidade com equipamentos portáteis e de baixo custo, democratizando o acesso à pesquisa experimental em antenas.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Analisar o impacto da inserção de fendas em arco, simples e dupla, no parâmetro S_{11} de antenas *patch* circulares projetadas para a frequência de 2,4 GHz em substrato FR-4, por meio de simulações eletromagnéticas no HFSS da ANSYS e validação experimental com o LiteVNA-64.

1.2.2 Objetivos específicos

- a) Realizar revisão bibliográfica sobre antenas de microfita, geometria circular, técnicas de inserção de fendas e comportamento multibanda, contextualizando o estado da arte;
- b) Dimensionar analiticamente a antena *patch* circular para a frequência de 2,4 GHz, com base nas equações clássicas do modelo de cavidade ressonante;
- c) Definir e implementar as quatro configurações geométricas no HFSS, incluindo a antena sem fenda (referência), com fenda à esquerda, com fenda à direita e com duas fendas;
- d) Analisar comparativamente os resultados simulados de S_{11} e VSWR para as quatro configurações, identificando o impacto da posição e do número de fendas;

- e) Fabricar o protótipo da configuração com duas fendas por corte CNC a laser sobre substrato FR-4;
- f) Determinar experimentalmente os parâmetros S_{11} e VSWR com o LiteVNA-64 e comparar com os resultados simulados.

1.3 Estrutura Trabalho de Conclusão de Curso (TCC)

Este trabalho está organizado em cinco Capítulos. O Capítulo 2 apresenta a fundamentação teórica sobre antenas de microfita, abrangendo constituição, geometrias, substratos, métodos de alimentação, modelos de análise, parâmetros de desempenho e o papel das fendas no comportamento eletromagnético de antenas *patch* circulares.

O Capítulo 3 descreve a metodologia de projeto e desenvolvimento: dimensionamento analítico, especificação dos parâmetros geométricos das fendas em arco, implementação no HFSS e o processo de fabricação do protótipo por CNC a laser, incluindo o procedimento de medição experimental com o LiteVNA-64.

O Capítulo 4 apresenta e discute os resultados das simulações das quatro configurações e da caracterização experimental do protótipo com duas fendas, com análise comparativa de S_{11} e VSWR e discussão das discrepâncias observadas.

O Capítulo 5 sintetiza as conclusões, destaca as contribuições do trabalho e aponta perspectivas para pesquisas futuras.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo consolida os fundamentos teóricos que embasam o projeto, a simulação e a análise das antenas de microfita desenvolvidas neste trabalho. São abordados aspectos construtivos, modelos matemáticos de dimensionamento, parâmetros de desempenho e o papel das fendas no comportamento eletromagnético de antenas *patch* circulares, com referências à literatura científica atualizada.

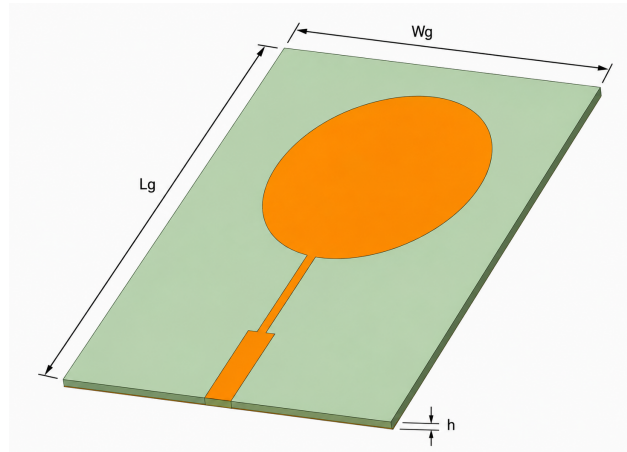
2.1 Antenas de Microfita: Constituição e Histórico

O desenvolvimento das antenas de microfita remonta à proposta pioneira de Deschamps, em 1953, e à contribuição independente de Gutton e Baissinot, em 1955. Entretanto, somente na década de 1970, com os trabalhos práticos de Howell (HOWELL, 1975) e Munson (MUNSON, 1974), essas antenas alcançaram implementações funcionais que demonstraram seu potencial real para aplicações em sistemas de comunicação. A partir desse marco, o interesse científico cresceu continuamente, acompanhando a expansão dos sistemas de comunicação sem fio (BALANIS, 2016).

Estruturalmente, uma antena de microfita é composta por três elementos principais, Figura 1 (BALANIS, 2016; KUMAR; RAY, 2003):

- Elemento irradiante (*patch*): condutor metálico, geralmente cobre, impresso na face superior do substrato. Sua geometria e dimensões determinam a frequência de ressonância e as características de irradiação;
- Substrato dielétrico: camada isolante que separa o *patch* do plano de terra, fornecendo suporte mecânico e influenciando diretamente as propriedades elétricas da antena;
- Plano de terra: condutor metálico na face inferior do substrato, responsável por refletir a energia eletromagnética e definir o perfil de irradiação hemisférico.

O mecanismo de irradiação ocorre nas descontinuidades nas bordas abertas do *patch*, onde o campo elétrico confinado entre o *patch* e o plano de terra se projeta para o espaço livre, gerando a onda eletromagnética irradiada (BALANIS, 2016). Os condutores metálicos juntos formam uma linha de transmissão de microfita ressonante com comprimento de aproximadamente meio comprimento de onda na frequência de operação (MORAIS, 2011).

Figura 1 – Modelo de antena *patch*.

Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

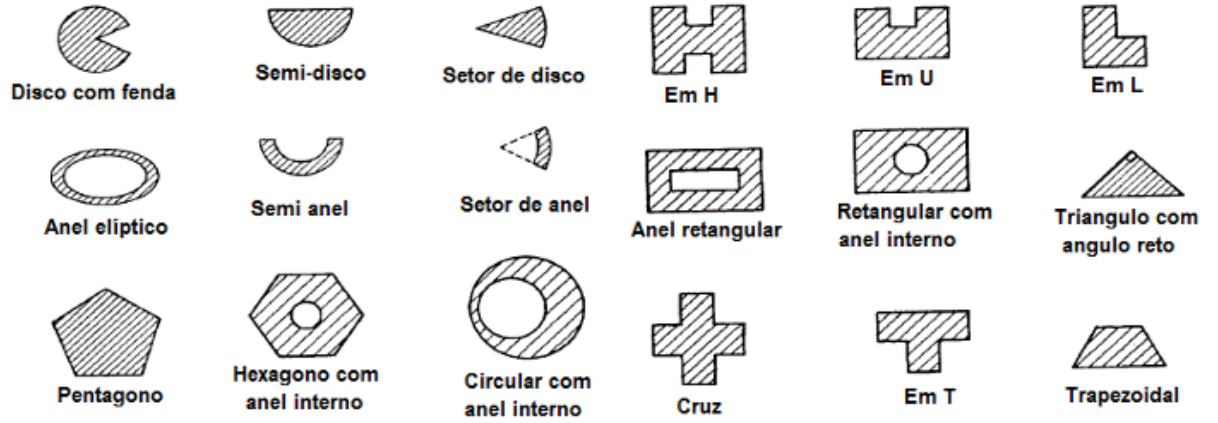
2.1.1 Vantagens e Limitações

As principais vantagens das antenas de microfitas são amplamente documentadas na literatura (BALANIS, 2016; KUMAR; RAY, 2003; MORAIS, 2011), destacando-se: baixo peso e reduzido volume; perfil planar; baixo custo de fabricação e compatibilidade com processos de fabricação de placas de circuito impresso (PCB – *Printed Circuit Board*); facilidade de integração com circuitos ativos e passivos de micro-ondas; flexibilidade no projeto da geometria, da polarização e da frequência de ressonância; além de elevada reprodutibilidade em processos de fabricação em escala industrial.

Em contrapartida, as limitações inerentes são (BALANIS, 2016; MORAIS, 2011): estreita largura de banda (tipicamente 1% a 5% para substratos convencionais); baixa eficiência de radiação em substratos de alta permissividade; ganho moderado (aproximadamente 5 a 8 dBi); possibilidade de excitação de ondas de superfície que degradam o diagrama de irradiação; e baixa potência de operação. A superação dessas limitações motiva extensas pesquisas em todo o mundo (KUMAR; RAY, 2003; TEWARY et al., 2023).

2.2 Elemento Irradiante: Geometria e aplicações

O *patch* pode apresentar diferentes geometrias, tais como retangular, quadrada, circular, elíptica, triangular, formas híbridas entre outras, Figura 2. Dentre essas configurações, as geometrias retangular e circular são as mais frequentemente empregadas, em virtude da facilidade de modelagem e análise, bem como das suas características de irradiação adequadas para diversas aplicações (BALANIS, 2016).

Figura 2 – Formatos tipicamente usados em antenas *patch*.

Fonte: (LACERDA; JUNIOR, 2008).

A geometria circular apresenta características que a tornam particularmente relevantes para aplicações em antenas de microfitas (BALANIS, 2016; BIRWAL; PATEL; SINGH, 2024; SOUSA et al., 2025):

- Simetria rotacional que produz diagrama de irradiação azimutalmente simétrico;
- Suporte natural a múltiplos modos ressonantes (TM_{11} , TM_{21} , TM_{01} , entre outros), que podem ser explorados para obtenção de operação multibanda;
- Compatibilidade com a inserção de fendas em arco, que preservam a simetria da estrutura e permitem controle preciso sobre os parâmetros de desempenho.

A relevância das antenas *patch* circulares em sistemas modernos de comunicação é amplamente reconhecida. Aplicações documentadas incluem sistemas de posicionamento global (GPS – *Global Positioning System*) (BALANIS, 2016), Radares de Abertura Sintética (SAR – *Synthetic Aperture Radar*), comunicações por satélite, sistemas de identificação por radiofrequência (RFID – *Radio Frequency Identification*) (BIRWAL; PATEL; SINGH, 2024), sistemas de comunicação veículo-tudo (V2X – *Vehicle-to-Everything*) (TIANG et al., 2024), redes da Internet das Coisas (IoT – *Internet of Things*) (JANARTHANAN et al., 2024) e antenas para dispositivos vestíveis (wearables – *wearable devices*) (TIANG et al., 2024).

2.3 Substratos Dielétricos

A escolha do substrato é fator determinante no desempenho da antena. Substratos com baixa constante dielétrica relativa (ϵ_r) e maior espessura favorecem eficiência e largura de banda mais elevadas, porém resultam em antenas de maiores dimensões. Substratos

de alta ε_r permitem miniaturização, mas em geral apresentam maiores perdas e banda estreita (BALANIS, 2016; MORAIS, 2011).

As propriedades elétricas dos principais substratos utilizados em antenas de microfita, reportados na literatura, estão listados na Tabela 1.

Tabela 1 – Propriedades elétricas de substratos comuns para antenas de microfita.

Material	ε_r	$\tan \delta$	Característica principal
FR-4	4,4	0,02	Baixo custo, uso geral
Rogers RT/duroid 5880	2,2	0,0009	Baixas perdas, alta frequência
Rogers RO3010	10,2	0,0023	Miniaturização
PTFE	2,5	0,002	Perdas muito baixas
Alumina	9,2	0,008	Alta temperatura
Ferrita	12	≈ 0	Substratos magnetizáveis

Fonte: Adaptado de (MORAIS, 2011).

Neste trabalho, foi adotado o substrato FR-4 com $\varepsilon_r = 4,4$, $\tan \delta \approx 0,02$ e espessura $h = 1,5$ mm. A escolha desse substrato justifica-se pelo seu baixo custo, ampla disponibilidade comercial e compatibilidade com o processo de fabricação por corte a laser controlado por Controle Numérico Computadorizado (CNC – *Computer Numerical Control*) empregado no FABLAB do CAMTUC da UFPA.

2.4 Métodos de Alimentação

Os métodos de alimentação de antenas *patch* são classificados em diretos e indiretos (BALANIS, 2016; MORAIS, 2011). Os métodos diretos — por linha de microfita e por cabo coaxial — realizam a conexão física entre a linha de transmissão e o *patch*. Os métodos indiretos — por acoplamento por abertura e por proximidade — transferem energia eletromagneticamente, sem contato físico direto (MORAIS, 2011).

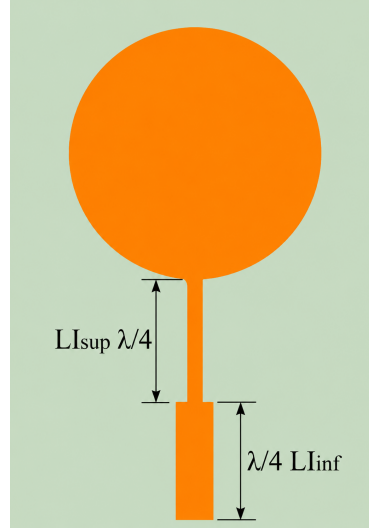
2.4.1 Alimentação por Linha de Microfita com Transformador $\lambda/4$

Nesta técnica, uma fita condutora estreita é impressa no mesmo plano do substrato que o *patch*, realizando a conexão entre a fonte de alimentação e o elemento irradiante. Para garantir o casamento de impedância com a linha padrão de 50Ω , pode-se empregar um transformador de quarto de comprimento de onda ($\lambda/4$), que ajusta a impedância de entrada do *patch* ao valor desejado (BALANIS, 2016).

Esta foi a técnica adotada neste trabalho. A estrutura de alimentação é composta por uma linha principal de largura $W_{1D} = 5$ mm e uma seção estreita de largura $W_{1H} = 1,5$ mm, com comprimento total $L_1 = 31,17$ mm, dividido em $L_{1\text{inf}} = 15,65$ mm (parte inferior) e $L_{1\text{sup}} = 15,52$ mm (parte superior), conforme indicado na Figura 3. Essa configuração foi projetada para promover o casamento de impedância entre a linha de

alimentação de 50Ω e o elemento irradiador, favorecendo a transferência eficiente de potência.

Figura 3 – Método de alimentação por linha de microfita.



Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

2.4.2 Alimentação por Cabo Coaxial

Consiste em um cabo coaxial que atravessa o plano de terra e o substrato até o *patch* irradiante. Apresenta baixa radiação espúria e posicionamento flexível do ponto de alimentação, mas é de modelagem mais complexa e apresenta banda estreita (BALANIS, 2016; MORAIS, 2011).

2.4.3 Acoplamento por Abertura e por Proximidade

Técnicas indiretas que permitem maior largura de banda e menor radiação espúria, ao custo de maior complexidade construtiva por exigirem estruturas de múltiplas camadas (MORAIS, 2011; ZÜRCHER; GARDIOL, 1995).

2.5 Modelos de Análise para *Patches* Circulares

2.5.1 Modelo de Cavidade Ressonante

O modelo de cavidade trata a região entre o *patch* e o plano de terra como uma cavidade ressonante com paredes laterais magnéticas, permitindo calcular os campos internos, a impedância de entrada e as frequências de ressonância com boa precisão (BALANIS, 2016). Para antenas *patch* circulares, a frequência de ressonância do modo TM_{mn} é dada pela Equação (1).

$$f_{mn} = \frac{X'_{mn} \cdot c}{2\pi a_e \sqrt{\epsilon_r}} \quad (1)$$

onde X'_{mn} é a n -ésima raiz da derivada da função de Bessel de ordem m , c é a velocidade da luz no vácuo e a_e é o raio efetivo do *patch*, Equação (2) que incorpora o efeito de franja nas bordas (BALANIS, 2016).

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

Para o modo fundamental TM_{11} , $X'_{11} = 1,8412$, e o raio físico pode ser estimado inicialmente através da Equação (3), (BALANIS, 2016).

$$a = \frac{F}{\left\{ 1 + \frac{2h}{\pi \varepsilon_r F} \left[\ln \left(\frac{\pi F}{2h} \right) + 1,7726 \right] \right\}^{1/2}} \quad (3)$$

em que $F = \frac{8,791 \times 10^9}{f_r \sqrt{\varepsilon_r}}$ e f_r é a frequência de ressonância desejada em Hz.

2.5.2 Método dos Elementos Finitos (FEM) e o *Software* HFSS da ANSYS

O Método dos Elementos Finitos (FEM) é um método de onda completa que divide o domínio de análise em elementos tetraédricos e resolve numericamente as equações de Maxwell em cada elemento (BALANIS, 2016). É o método utilizado pelo *software* HFSS da ANSYS, que proporciona análise eletromagnética de onda completa, adequado para geometrias complexas, como as fendas em arco investigadas neste trabalho. A malha adaptativa do HFSS refina automaticamente os elementos nas regiões de maior variação de campo, garantindo a convergência dos resultados com eficiência computacional (ANSYS, 2026).

2.6 Parâmetros de Desempenho

2.6.1 Coeficiente de Reflexão S_{11}

O parâmetro S_{11} — também denominado coeficiente de reflexão — representa a razão entre a tensão refletida e a tensão incidente na onda incidente na porta de alimentação, expresso em decibéis, Equação (4) (BALANIS, 2016):

$$S_{11} [\text{dB}] = 20 \log_{10} |\Gamma| \quad (4)$$

em que Γ é o coeficiente de reflexão de tensão. O critério convencional adotado na literatura é $S_{11} \leq -10$ dB, que indica que pelo menos 90% da potência incidente é absorvida pela antena (BALANIS, 2016; MORAIS, 2011). Este foi o critério utilizado neste trabalho para identificar as bandas de operação de cada configuração.

2.6.2 VSWR (*Voltage Standing Wave Ratio*)

A Razão de Onda Estacionária de Tensão (VSWR) quantifica o grau de adaptação de impedância entre a linha de transmissão e a antena e está relacionada ao S_{11} por (BALANIS, 2016) na Equação (5).

$$\text{VSWR} = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|} \quad (5)$$

Para uma antena bem casada, geralmente requer $\text{VSWR} \leq 2,0$ (equivalente a $S_{11} \leq -9,5$ dB), e o valor ideal é $\text{VSWR} = 1$ (casamento perfeito, sem reflexão) (MORAIS, 2011). Neste trabalho, ambos os critérios de $S_{11} \leq -10$ dB e $\text{VSWR} < 2$ foram adotados para avaliação do desempenho.

2.6.3 Largura de Banda

Neste TCC a largura de banda (*Bandwidth* – BW) é definida como o intervalo de frequências em que o coeficiente de reflexão satisfaz o critério $S_{11} \leq -10$ dB. Pode ser expressa em MHz ou GHz (absoluta) ou como percentual em relação à frequência central f_0 Equação (6), (BALANIS, 2016):

$$\text{BW} [\%] = \frac{f_{\text{sup}} - f_{\text{inf}}}{f_0} \times 100 \quad (6)$$

2.6.4 Ganho e Diagrama de Irradiação

O ganho de uma antena é definido como o produto de sua diretividade pela eficiência de irradiação. Para antenas *patch* de microfita, o ganho típico varia entre 5 e 8 dBi (BALANIS, 2016). O diagrama de irradiação descreve a distribuição espacial da intensidade de campo irradiado, podendo ser representado em 2D (planos E e H) ou em 3D (BALANIS, 2016).

2.7 Fendas em Antenas *Patch*: Fundamentos e Estado da Arte

A inserção de fendas (*slots*) no *patch* é uma das técnicas mais estudadas para modificar o comportamento eletromagnético de antenas de microfita (KASHYAP et al., 2022; BHATT; MAKWANA, 2024). O mecanismo de atuação das fendas pode ser compreendido em termos da distribuição de corrente superficial: ao introduzir aberturas no *patch*, as correntes são forçadas a desviar o caminho e contornar as fendas, aumentando o comprimento elétrico efetivo percorrido (BHATT; MAKWANA, 2024). Como consequência:

- A frequência de ressonância fundamental é deslocada para valores mais baixos (sem aumento das dimensões físicas) — efeito de miniaturização;

- Novos modos ressonantes são excitados, habilitando operação em múltiplas bandas de frequência (TEWARY et al., 2023; BIRWAL; PATEL; SINGH, 2024);
- O diagrama de irradiação pode ser modificado, dependendo da geometria e posição da fenda (KASHYAP et al., 2022).

Bhatt e Makwana (2024) demonstraram que fendas retangulares em *patches* circulares permitem operação simultânea nas bandas de 5G e WLAN (*Wireless Local Area Network*) — Rede Local Sem Fio/WiMAX (*Worldwide Interoperability for Microwave Access* – Interoperabilidade Mundial para Acesso por Micro-ondas) com S_{11} inferior a -10 dB. Birwal, Patel e Singh (2024) investigaram fendas circulares para aplicações em leitores RFID na faixa de 2,45 GHz. Kashyap et al. (2022) verificaram ganhos de até 3 dBi com a combinação de fendas e nanofilmes metálicos para WLAN. Tewary et al. (2023) ampliaram a largura de banda em mais de 60% com a combinação de fendas e estruturas FSS.

As fendas em arco, especificamente, são particularmente adequadas para *patches* circulares por três razões principais: (i) a geometria curva se adapta naturalmente ao contorno do *patch* circular, preservando a simetria da estrutura; (ii) os parâmetros geométricos — raio, ângulo central e largura — oferecem graus de liberdade adicionais para ajuste da frequência e da largura de banda; e (iii) a posição e orientação da fenda em relação ao ponto de alimentação exercem influência determinante no casamento de impedância. Dessa forma, observa-se que as fendas em arco desempenham papel fundamental na otimização de antenas *patch* circulares, permitindo ajustes finos em parâmetros como frequência de ressonância, largura de banda e casamento de impedância. Considerando essas vantagens e relevâncias, o capítulo seguinte apresenta a metodologia de simulação e análise dos modelos propostos, de modo a verificar, na prática, os impactos dessas modificações estruturais sobre o desempenho da antena.

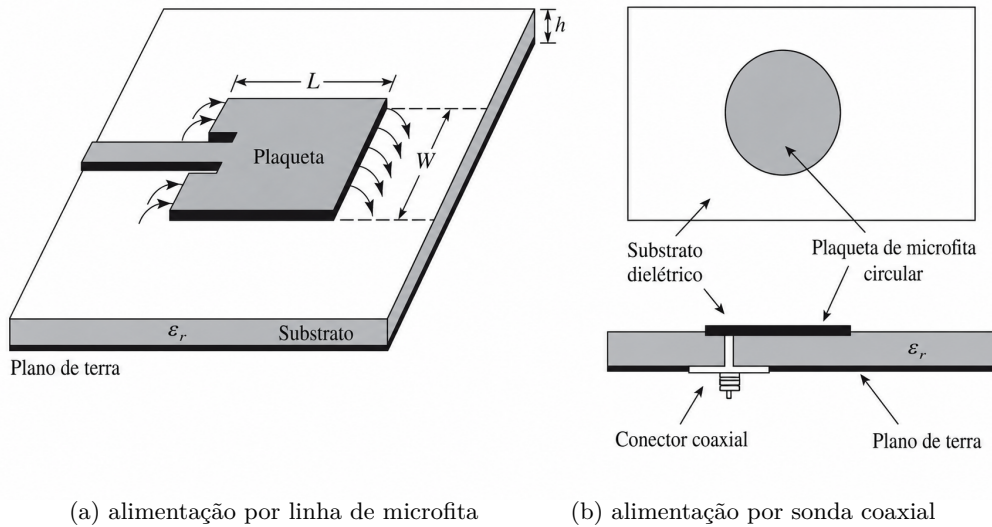
3 METODOLOGIA E DESENVOLVIMENTO

Este capítulo descreve o processo de desenvolvimento da antena de microfita *patch* circular com fendas em arco. São apresentadas as etapas de dimensionamento analítico, especificação geométrica das quatro configurações investigadas, implementação no *software* HFSS, fabricação do protótipo por corte CNC a laser e procedimento de caracterização experimental.

3.1 Dimensionamento Analítico da Antena de Referência

O projeto partiu de uma antena *patch* circular convencional como da Figura 4, dimensionada para operar no modo fundamental TM_{11} na frequência de $f_0 = 2,4$ GHz, utilizando as equações clássicas de projeto descritas em (BALANIS, 2016). Os parâmetros do substrato adotados estão listados na Tabela 2.

Figura 4 – Formas típicas de *patch* de microfita.



Fonte: (BALANIS, 2005).

Tabela 2 – Descrição do material da antena projetada.

Parâmetro	Valor	Unidade
Material (FR-4)		
Permissividade relativa (ϵ_r)	4,4	
Tangente de perdas ($\tan \delta \approx$)	0,02	
Espessura (h)	1,5	mm

Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

A partir da Equação (1), isolando o raio físico a para a frequência de projeto e com $X'_{11} = 1,8412$, obtém-se a Equação (7):

$$a = \frac{X'_{11} \cdot c}{2\pi f_0 \sqrt{\varepsilon_r}} = \frac{1,8412 \times 3 \times 10^8}{2\pi \times 2,4 \times 10^9 \times \sqrt{4,4}} \approx 17,44 \text{ mm} \quad (7)$$

Após a incorporação do efeito de borda pela Equação (2) e ajuste empírico por varredura paramétrica no ambiente de simulação, o raio físico do *patch* foi definido como $R \approx 16,98 \text{ mm}$.

As dimensões do substrato e do plano de terra foram fixadas em $W_g = 50 \text{ mm}$ e $L_g = 73 \text{ mm}$, garantindo espaço adequado para a estrutura de alimentação e um plano de terra suficientemente extenso para estabilidade do diagrama de irradiação.

3.2 Estrutura de Alimentação

A alimentação foi implementada por meio de uma estrutura de adaptação de impedância para 50Ω , baseada em um transformador de quarto de comprimento de onda ($\lambda/4$), conforme descrito em Sousa et al. (2025) para antenas *patch* circulares em substrato FR-4. Essa estrutura é composta pelos elementos descritos na Tabela 3.

Tabela 3 – Descrição da linha de microfitas da antena proposta.

Parâmetro	Valor	Unidade
Linha principal: largura (W_{1D})	5	mm
Seção de transformação ($\lambda/4$): largura (W_{1H})	1,5	mm
Comprimento total da linha de alimentação (L_1)	31,17	mm
Parte inferior da linha: (L_{1inf})	15,65	mm
Parte superior da linha: (L_{1sup})	15,52	mm

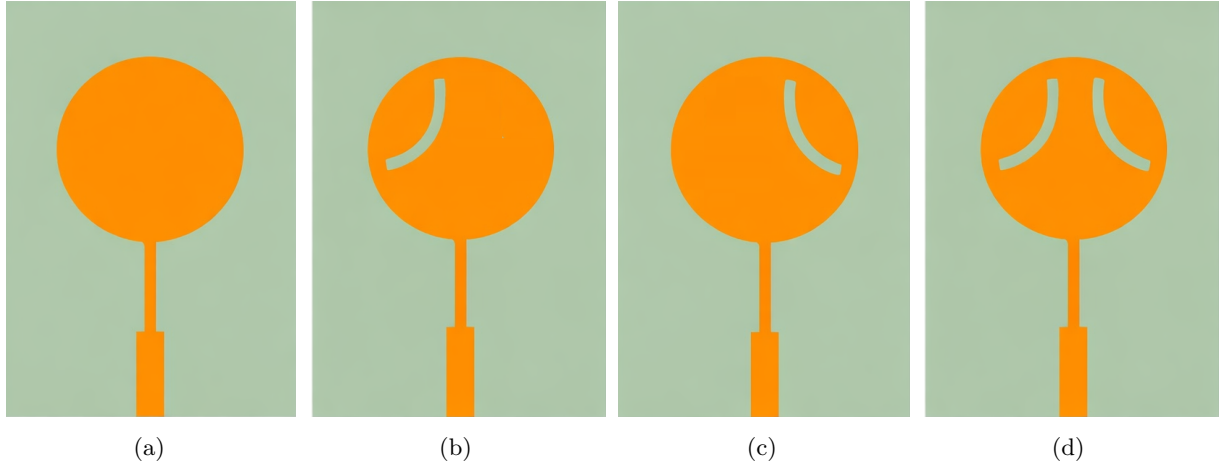
Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

3.3 Configurações Geométricas Investigadas

A partir da antena básica (sem fenda), quatro configurações foram investigadas, conforme apresentado na Figura 5:

- Antena sem fenda — configuração básica;
- Antena com uma fenda em arco à esquerda do *patch*;
- Antena com uma fenda em arco à direita do *patch*;
- Antena com fendas em arco dupla (esquerda e direita simultaneamente).

Figura 5 – Configurações analisadas no estudo.



Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

3.3.1 Parâmetros Geométricos das Fendas em Arco

As fendas foram modeladas como arcos de circunferência. Os parâmetros geométricos foram determinados por ajuste empírico em ambiente de simulação, com o objetivo de otimizar o desempenho da antena, Tabela 4. A otimização teve como objetivo principal ajustar a frequência de ressonância da antena para a faixa desejada de operação, garantindo valores de (S_{11}) inferiores a ≤ -10 dB. Além disso, buscou-se ampliar a largura de banda útil e, em determinadas configurações, explorar a possibilidade de operação em banda dupla. Dessa forma, o processo de ajuste geométrico das fendas visou não apenas o casamento de impedância, mas também a melhoria da versatilidade da antena em aplicações multibanda.

Tabela 4 – Parâmetros Geométricos das Fendas em Arco.

Parâmetro	Valor	Unidade
Comprimento do arco da fenda (L_c)	16,59	mm
Largura da fenda (W_c)	1,73	mm
Raio dos arcos das fendas ($R_s = R_d$)	13,63	mm
Ângulo central da fenda em relação ao centro do patch (θ_s)	150	graus
Ângulo central da fenda em relação ao centro do patch (θ_d)	30	graus
Ângulo entre as fendas (θ_d e θ_s)	120	graus
Separação entre fendas (D_c)	5,45	mm
Distância entre o centro do patch para o centro do arco: (R_s)	19,54	mm

Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

Os centros dos arcos foram posicionados simetricamente em relação ao eixo vertical do patch, garantindo simetria geométrica da estrutura.

O posicionamento dos centros dos arcos foi definido de modo que ambos se situem sobre a linha horizontal média do *patch*, garantindo que as fendas mantenham a mesma altura em relação ao plano de referência da antena. Essa escolha geométrica assegura que os arcos estejam alinhados com o eixo de simetria horizontal, evitando deslocamentos verticais que poderiam comprometer a uniformidade do campo elétrico e o equilíbrio das correntes superficiais. A disposição dos centros ao longo dessa linha horizontal também contribui para a uniformidade do acoplamento eletromagnético entre o *patch* e a linha de alimentação, uma vez que as fendas atuam de maneira equivalente em ambos os lados da estrutura. Dessa forma, o projeto preserva a simetria nas direções vertical e horizontal, resultando em uma configuração equilibrada, com desempenho consistente e fácil replicação durante o processo de fabricação.

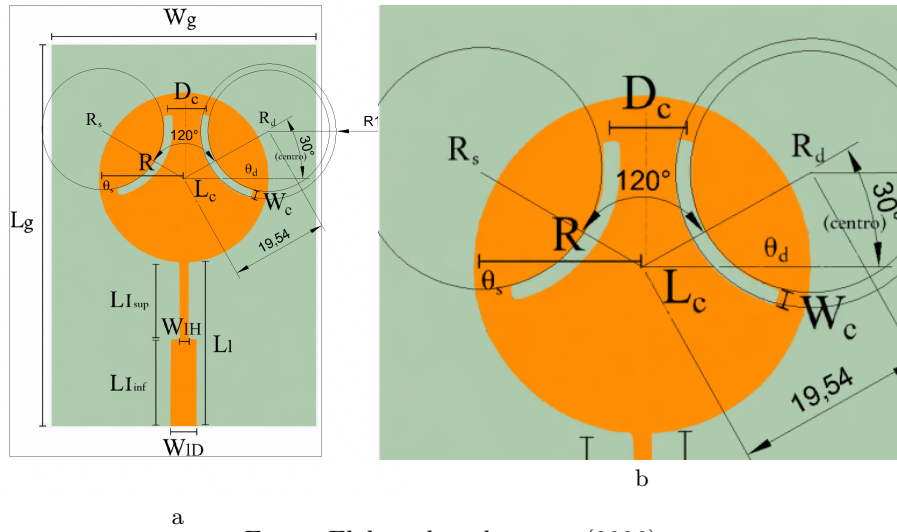
Todos os parâmetros geométricos adotados são apresentados na Tabela 5. A configuração da antena proposta, com a indicação de seus parâmetros geométricos, é ilustrada na Figura 6.

Tabela 5 – Parâmetros físicos da antena projetada.

Parâmetro	Valor	Unidade
Substrato	FR-4	—
Permissividade relativa (ϵ_r)	4,4	—
Tangente de perdas ($\tan \delta$)	$\approx 0,02$	—
Espessura do substrato (h)	1,5	mm
Raio do <i>patch</i> (R)	16,98	mm
Largura do substrato/plano de terra (W_g)	50	mm
Comprimento do substrato/plano de terra (L_g)	73	mm
Largura da linha principal (W_{1D})	5	mm
Largura da linha de transformação (W_{1H})	1,5	mm
Comprimento total da linha de alimentação (L_1)	31,17	mm
Parte inferior ($L_{1\text{inf}}$)	15,65	mm
Parte superior ($L_{1\text{sup}}$)	15,52	mm
Comprimento do arco da fenda (L_c)	16,59	mm
Largura da fenda (W_c)	1,73	mm
Raio dos arcos das fendas ($R_s = R_d$)	13,63	mm
Ângulo central da fenda em relação ao centro do <i>patch</i> (θ_s)	150	graus
Ângulo central da fenda em relação ao centro do <i>patch</i> (θ_d)	30	graus
Ângulo entre as fendas (θ_d e θ_s)	120	graus
Separação entre fendas (D_c)	5,45	mm

Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

Figura 6 – Configuração proposta com indicação dos parâmetros geométricos e seus valores médios adotados. (a) detalhes da antena completa; (b) detalhe do *patch*.



Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

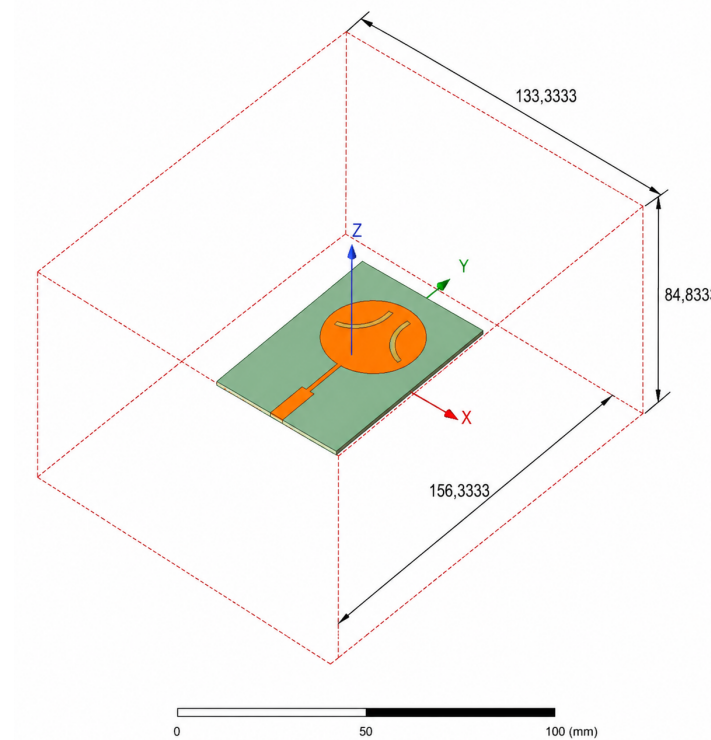
3.4 Implementação no *Software* HFSS

O modelo foi desenvolvido e simulado no *software* HFSS da ANSYS, (ANSYS, 2026), que emprega análise eletromagnética de onda completa baseada no Método dos Elementos Finitos (FEM). As configurações do ambiente de simulação foram:

- Faixa de frequência analisada: 1,5 a 6,0 GHz com 401 pontos;
- Condição de contorno de irradiação ao redor do modelo;
- Malha adaptativa com critério de convergência $\Delta S \leq 0,02$;
- Alimentação modelada como porta de onda (*lumped port*) na extremidade da linha de microfitas.

As quatro configurações foram simuladas mantendo todos os demais parâmetros constantes, de modo a isolar o efeito das fendas e permitir comparação direta entre as configurações.

A modelagem tridimensional desenvolvida no *software* HFSS, evidenciando não apenas a geometria da antena e da linha de alimentação, mas também o domínio de simulação delimitado pela caixa de irradiação, pode ser observada na Figura 7. As dimensões adotadas para esse volume foram de aproximadamente 156,33 mm no eixo Y, 133,33 mm no eixo X e 84,83 mm no eixo Z, garantindo espaço suficiente para a propagação das ondas eletromagnéticas e evitando reflexões artificiais nas fronteiras.

Figura 7 – modelagem de teste no *software* HFSS da ANSYS.

Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

3.5 Fabricação do Protótipo

O desenvolvimento e a fabricação do protótipo foram realizados no Laboratório de Fabricação Digital (FABLAB) do Campus Universitário de Tucuruí (CAMTUC), vinculado à Universidade Federal do Pará (UFPA). Optou-se por fabricar apenas a configuração com duas fendas em arco, por ter apresentado o comportamento multibanda mais expressivo nas simulações.

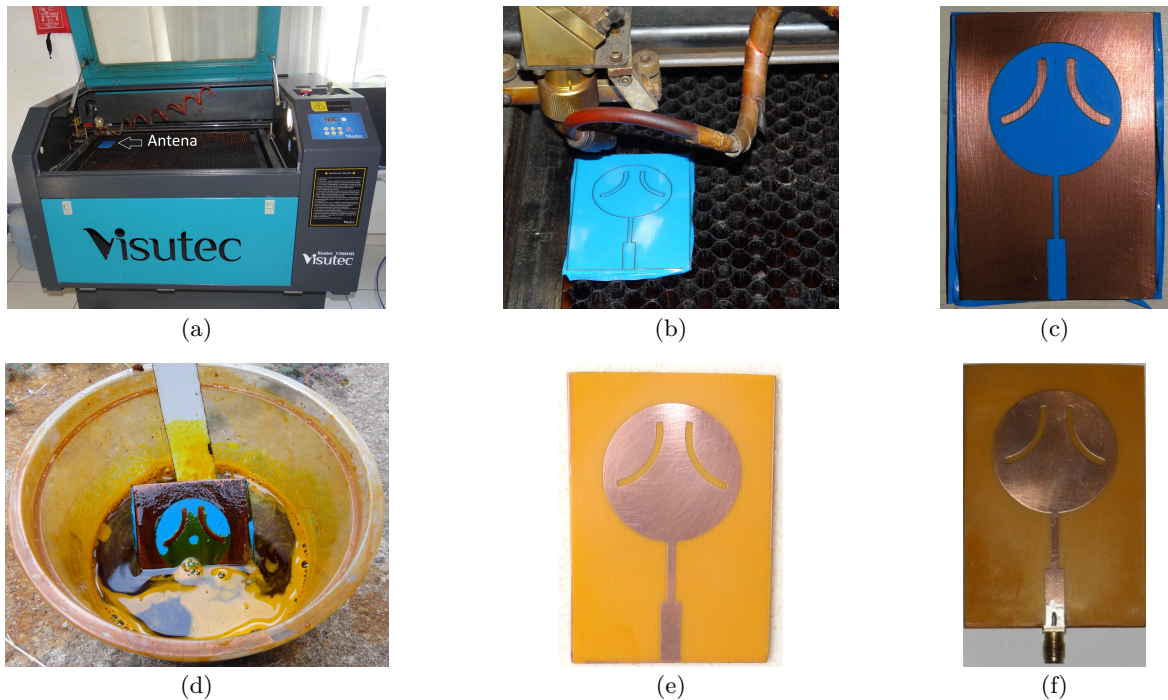
O processo de fabricação, ilustrado na Figura 8, foi realizado de acordo com as seguintes etapas:

- Para a etapa de corte do material adesivo foi empregada uma máquina CNC a laser Visutec VS6040, equipada com tubo de (CO_2) de (60W) e área útil de 60×40 cm. O equipamento possui precisão de 0,01 mm e é compatível com softwares de desenho como CorelDraw, permitindo a importação de projetos vetoriais para execução direta. A refrigeração é realizada por sistema de circulação de água, garantindo maior vida útil ao tubo de laser. Essa máquina foi escolhida por sua versatilidade no corte de materiais como MDF, acrílico e polímeros, além de possibilitar gravações em superfícies diversas, o que assegura qualidade e repetibilidade nos processos de fabricação da antena;
- Preparação de uma placa de FR-4 metalizada com cobre, seguida da aplicação de

uma máscara adesiva, previamente recortada em máquina CNC a laser, responsável por definir a geometria do *patch*;

- c) Remoção do material adesivo das regiões destinadas à corrosão química;
- d) Submissão da placa ao ataque químico com solução de perclorato de ferro (FeCl_3) (aproximadamente 30 minutos), removendo o cobre das áreas não protegidas e formando o padrão condutor desejado;
- e) Limpeza da placa e instalação do conector SMA na extremidade da linha de alimentação por microfita, com soldagem de estanho.

Figura 8 – Etapas de fabricação da antena: (a) máquina CNC a laser Visutec VS6040; (b) preparação do material adesivo por corte em CNC a laser; (c) remoção do adesivo nas regiões de corrosão; (d) ataque químico da placa; (e) antena fabricada; (f) antena fabricada com conector SMA fixado.



Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

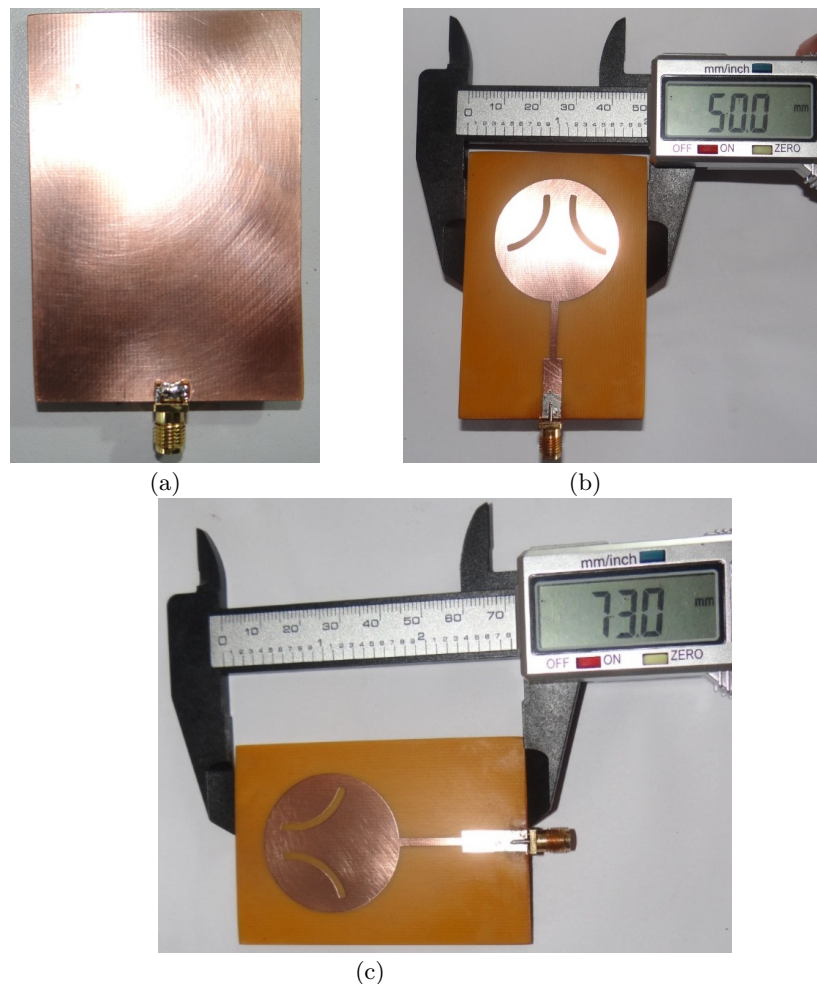
Para a etapa de corte do material adesivo foi utilizada uma máquina CNC a laser Visutec VS6040, equipada com tubo de (CO_2) de (60W) e área útil de 60x40cm, compatível com o *software* CorelDraw, Inkscape, etc.

O uso da máquina CNC a laser Visutec VS6040, garante precisão de 0,01 mm, para o corte da máscara adesiva conferiu maior precisão dimensional ao protótipo em comparação com processos artesanais de transferência por insolação UV, reduzindo incertezas geométricas nas fendas em arco — cujas dimensões são críticas para o desempenho da antena. Inicialmente, o corte da placa foi realizado de forma manual, utilizando arco e serra, com dimensões levemente superiores às especificadas. Essa etapa preliminar teve

como objetivo facilitar o manuseio e garantir margem para correções posteriores. Após essa preparação, foi aplicada a máscara adesiva em vinil, recortada por CNC a laser, responsável por definir com precisão a geometria do *patch*. O acabamento final e o ajuste fino das dimensões foram obtidos após a gravação do vinil, assegurando maior fidelidade ao projeto e melhor qualidade na definição das bordas da antena.

Esse procedimento híbrido — corte manual inicial seguido de acabamento automatizado — permitiu conciliar praticidade na preparação com precisão geométrica na etapa final, resultando em uma estrutura adequada para os ensaios experimentais. O protótipo fabricado, com indicação das dimensões medidas é visto na Figura 9.

Figura 9 – Caracterização do protótipo fabricado: (a) vista inferior, evidenciando o plano de terra e o conector SMA; (b) vista superior com medição da largura; (c) medição do comprimento total da antena.



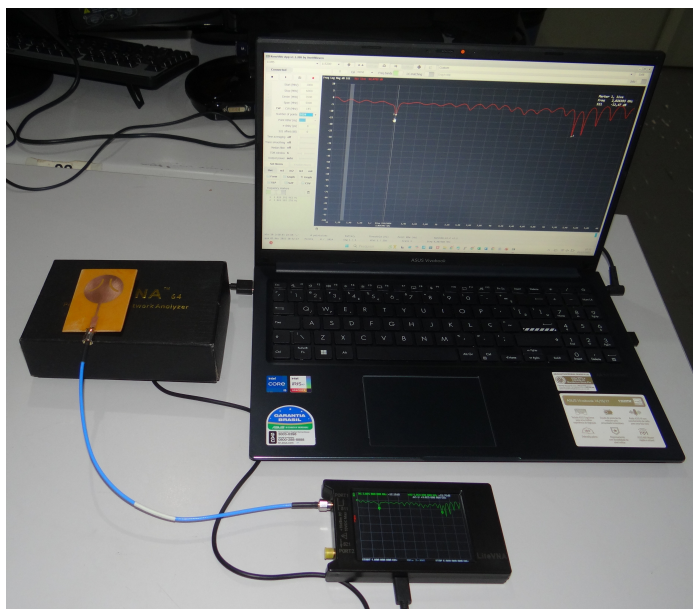
Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

3.6 Procedimento de Medição Experimental

As atividades de caracterização experimental foram realizadas no Laboratório de Síntese e Manutenção de Dispositivos (SMDLab) do CAMTUC. O equipamento utilizado foi o Analisador Vetorial de Redes (VNA) portátil modelo LiteVNA-64, calibrado pela

técnica *Short, Open, Load* (SOL), com faixa de operação de 50 kHz a 6,3 GHz. A aquisição e visualização dos dados foram realizadas com o *software* NanoVNA-App (NanoRFE, 2025), executado em um *notebook* acoplado ao analisador. A montagem experimental utilizada está ilustrada na Figura 10.

Figura 10 – Montagem experimental empregada para a realização das medições com o LiteVNA-64.



Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

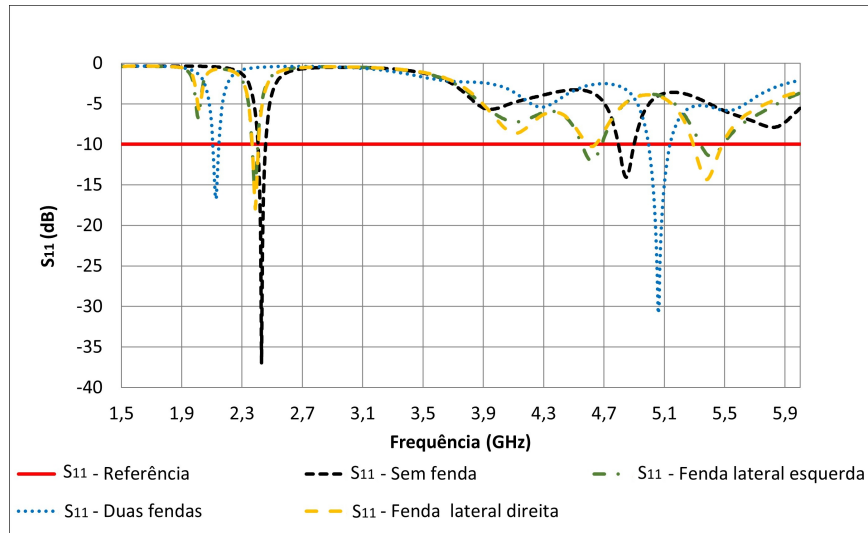
Este capítulo apresenta e analisa os resultados obtidos por meio das simulações eletromagnéticas das quatro configurações da antena *patch* circular, bem como da caracterização experimental realizada no protótipo com duas fendas em arco. Os resultados são discutidos com base nos critérios de desempenho adotados ($S_{11} \leq -10$ dB e VSWR < 2) e comparados com os dados reportados na literatura especializada.

Foram avaliados o coeficiente de reflexão (S_{11}) e a Razão de Onda Estacionária de Tensão (VSWR) na faixa de frequência de 1,5 a 6,0 GHz,.

4.1 Análise Comparativa das Quatro Configurações Simuladas

As curvas do parâmetro de espalhamento S_{11} em função da frequência para as quatro configurações analisadas — referência (sem fenda), com fenda à esquerda, com fenda à direita e com duas fendas — são apresentadas na Figura 11. A comparação entre os resultados permite avaliar a influência da inserção e do posicionamento das fendas sobre o comportamento eletromagnético da antena, especialmente em relação às frequências de ressonância, ao nível de adaptação de impedância e à largura de banda dos modos excitados.

Figura 11 – Resposta em frequência (S_{11}) da antena para todas as configurações analisadas (simulação).



Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

4.1.1 Configuração da antena básica (Sem Fenda)

A antena básica apresentou ressonâncias em 2,42 GHz ($S_{11} = -37$ dB) e em 4,84 GHz ($S_{11} = -14$ dB). O valor expressivo de -37 dB na frequência fundamental

evidencia bom casamento de impedância na frequência de projeto (2,4 GHz), confirmando a precisão do dimensionamento analítico e a adequação da estrutura de alimentação com transformador $\lambda/4$ (SOUSA et al., 2025). A segunda ressonância, em 4,84 GHz, corresponde ao modo TM_{21} da cavidade circular, que também satisfaz o critério de $S_{11} \leq -10$ dB.

4.1.2 Configuração com Fenda à Esquerda

A inserção de uma única fenda em arco à esquerda do *patch* modificou significativamente a resposta em frequência da antena, resultando em ressonâncias em 2,38 GHz ($S_{11} = -15,66$ dB), 4,62 GHz ($S_{11} = -12,10$ dB) e 5,41 GHz ($S_{11} = -11,45$ dB). Todas as três ressonâncias satisfazem o critério de $S_{11} \leq -10$ dB, habilitando operação em três bandas distintas.

O deslocamento da primeira ressonância de 2,42 GHz para 2,38 GHz, e o surgimento de uma nova ressonância em 5,41 GHz, são coerentes com o mecanismo descrito na literatura: a fenda aumenta o comprimento elétrico efetivo da antena, deslocando as frequências de ressonância existentes e criando novos modos de operação (KASHYAP et al., 2022; BHATT; MAKWANA, 2024).

4.1.3 Configuração com Fenda à Direita

A configuração com a fenda posicionada à direita do *patch* apresentou ressonâncias com valores de S_{11} próximos aos obtidos para a configuração com a fenda posicionada à esquerda, demonstrando que a posição da fenda exerce influência relevante no comportamento do parâmetro S_{11} . Foram identificadas ressonâncias em 2,38 GHz ($S_{11} = -17,96$ dB), 4,62 GHz ($S_{11} = -10,26$ dB) e 5,38 GHz ($S_{11} = -14,28$ dB).

A resposta em frequência da antena com fenda lateral direita apresenta três pontos de ressonância bem definidos. Esses resultados indicam que, nessas frequências, a antena apresenta boa adaptação de impedância, caracterizada pela redução do coeficiente de reflexão, contribuindo para uma maior eficiência na transferência de potência entre a linha de alimentação e o elemento irradiador.

Observa-se ainda que a introdução da fenda provoca deslocamentos nos pontos de ressonância em relação à antena de referência, além de proporcionar mínimos mais acentuados do parâmetro S_{11} em determinadas faixas de frequência. Esses valores mais negativos indicam uma melhoria na adaptação de impedância, reduzindo as perdas por reflexão e favorecendo o desempenho da antena nas bandas de operação identificadas.

Do ponto de vista eletromagnético, a fenda lateral direita altera a distribuição de correntes na superfície do *patch*, intensificando o acoplamento e contribuindo para uma resposta mais eficaz em termos de retorno de energia. Essa característica evidencia que a posição da fenda exerce influência direta sobre o desempenho da antena, tornando a

configuração com fenda direita uma alternativa promissora para otimizar a operação em determinadas frequências.

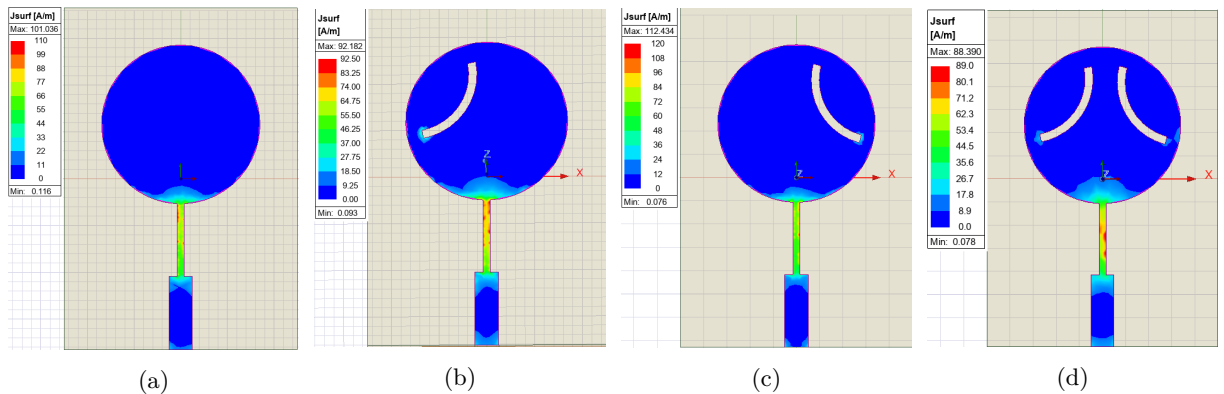
4.1.4 Configuração com Duas Fendas (Dupla)

A configuração com duas fendas em arco apresentou o comportamento multibanda mais expressivo de todas as configurações investigadas, com ressonâncias em 2,12 GHz ($S_{11} = -16,73$ dB) e 5,05 GHz ($S_{11} = -30,84$ dB). Ambas as ressonâncias satisfazem os critérios de desempenho adotados, com destaque para o valor de $-30,84$ dB em 5,05 GHz, que indica um bom casamento de impedância nesta banda.

Comparada à antena de referência (convencional), a configuração com duas fendas deslocou a primeira ressonância de 2,42 GHz para 2,12 GHz — uma redução de aproximadamente 300 MHz — confirmando que as fendas aumentam o comprimento elétrico da antena e reduzem sua frequência de operação (KASHYAP et al., 2022). A segunda ressonância, em 5,05 GHz, representa uma nova banda de operação habilitada pelas fendas, próxima à faixa de 5 GHz utilizada em redes Wi-Fi IEEE 802.11a/n/ac (BHATT; MAKWANA, 2024).

Esse comportamento está associado à perturbação na distribuição de corrente superficial no *patch*, as duas fendas simétricas forçam a corrente a percorrer caminhos mais longos e diferentes ao redor de cada fenda, gerando múltiplos modos ressonantes com características de irradiação similares (BIRWAL; PATEL; SINGH, 2024; TEWARY et al., 2023). A distribuição de corrente superficial para todos os cenários estudados estão ilustrados na Figura 12.

Figura 12 – Distribuição de corrente superficial no *patch* das antenas projetadas: (a) antena sem fenda; (b) antena com fenda lateral esquerda; (c) antena com fenda lateral direita; (d) antena com fenda dupla.



Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

Os parâmetros de desempenho simulados das quatro configurações estão resumidos na Tabela 6.

Tabela 6 – Parâmetros de desempenho simulados das quatro configurações da antena.

Configuração	Freq. de ressonância	S_{11} mín.	Critério atendido
Sem fenda	2,42 / 4,84 GHz	-37 / -14 dB	Sim (2 bandas)
Fenda esquerda	2,38 / 4,62 / 5,41 GHz	-15,66 / -12,10 / -11,45 dB	Sim (3 bandas)
Fenda direita	—	> -10 dB	Não
Duas fendas	2,12 / 5,05 GHz	-16,73 / -30,84 dB	Sim (2 bandas)

Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

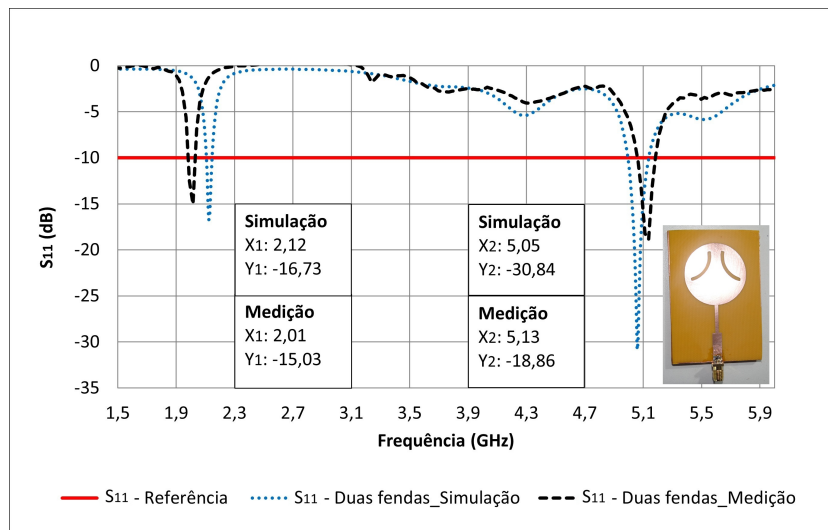
4.2 Resultados Experimentais e Comparação com a Simulação

4.2.1 Coeficiente de Reflexão S_{11}

Optou-se por realizar a fabricação apenas da antena com duas fendas em arco. Os resultados simulados e experimentais do parâmetro S_{11} estão ilustrados na Figura 13. Na simulação, as duas ressonâncias ocorrem em aproximadamente 2,12 GHz ($S_{11} = -16,73$ dB) e 5,05 GHz ($S_{11} = -30,84$ dB). Nos resultados experimentais, essas ressonâncias foram deslocadas para 2,01 GHz ($S_{11} = -15,03$ dB) e 5,13 GHz ($S_{11} = -18,86$ dB), respectivamente.

Em termos percentuais, os desvios entre simulação e medição são de aproximadamente 5,19% para a primeira frequência de ressonância e 1,58% para a segunda. Ambas as ressonâncias medidas satisfazem o critério de $S_{11} \leq -10$ dB, validando a funcionalidade da antena fabricada nas duas bandas de interesse.

Em relação à largura de banda, na simulação obtêm-se aproximadamente 30 MHz para a primeira banda e 140 MHz para a segunda. Nos resultados medidos, as larguras de banda são de aproximadamente 50 MHz e 120 MHz, respectivamente.

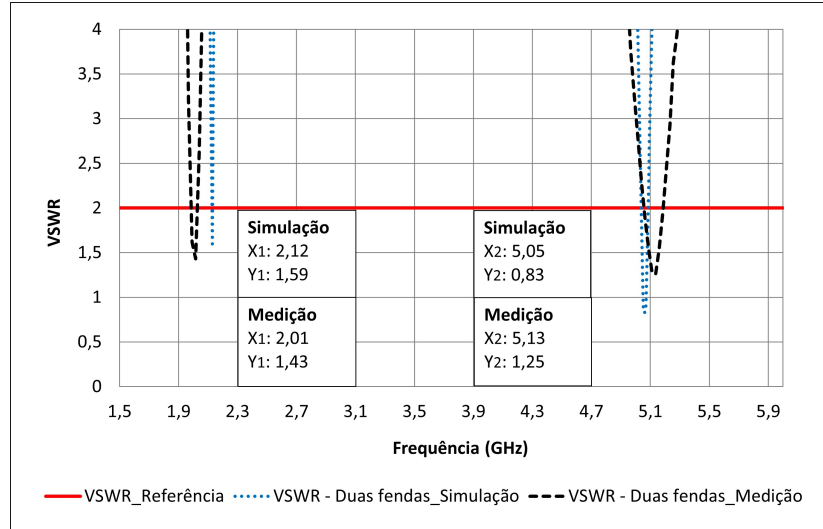
Figura 13 – Comparação entre os resultados simulados e medidos do parâmetro S_{11} para a antena com duas fendas.

Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

4.2.2 Análise do VSWR

O VSWR em função da frequência para a antena com duas fendas é apresentado na Figura 14, com resultados simulados e medidos sobrepostos.

Figura 14 – VSWR em função da frequência da antena com duas fendas — simulação e medição.



Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

Na simulação, são obtidos valores mínimos de VSWR de 1,59 em 2,12 GHz e 0,83 em 5,05 GHz. Nos resultados experimentais, observam-se valores de 1,43 em 2,01 GHz e 1,25 em 5,13 GHz. Em ambas as bandas e em ambos os cenários (simulado e medido), o VSWR permanece inferior a 2, confirmando o bom casamento de impedância da antena fabricada.

O valor de VSWR simulado em torno de 5,05 GHz ($VSWR \approx 0,83$) não é fisicamente possível, já que o menor valor admissível é 1. Esse resultado decorre de aproximações numéricas do simulador e da ausência de perdas adicionais do conector e da solda, situação em que a impedância de entrada pode apresentar leve componente reativa que, combinada com a impedância da porta de alimentação, gera valores artificiais abaixo de 1. Na prática, a medição realizada ($VSWR = 1,25$) é mais representativa das condições reais de operação da antena.

4.2.3 Discussão das Discrepâncias entre Simulação e Medição

As diferenças observadas entre os resultados simulados e experimentais são esperadas e estão dentro da margem típica para protótipos fabricados por processos artesanais em substrato FR-4. As principais causas identificadas são:

- Variações na permissividade dielétrica do FR-4: o substrato FR-4 apresenta tolerâncias de fabricação na constante dielétrica ($\epsilon_r = 4,4 \pm 0,2$), que provocam variações nas frequências de ressonância;

- Incertezas no processo de corrosão: variações na concentração da solução de perclorato de ferro e no tempo de ataque químico podem resultar em pequenas diferenças nas dimensões do *patch* e das fendas em relação ao projeto. Uma solução mais concentrada remove cobre mais rapidamente, enquanto uma solução mais diluída pode deixar resíduos ou exigir mais tempo de ataque. Se a placa permanecer mais tempo na solução, o ataque ultrapassa as dimensões projetadas, resultando em *patch* e fendas ligeiramente maiores. Se o tempo for insuficiente, pode sobrar cobre em excesso, reduzindo a abertura das fendas. Essas variações são reais e explicam por que as dimensões finais podem não coincidir exatamente com o modelo simulado. Em antenas de microfita, diferenças de décimos de milímetro já impactam a frequência de ressonância, tornando esse fator relevante para justificar discrepâncias entre teoria e prática;
- Influência do conector SMA e da soldagem: o conector SMA e a solda introduzem capacitâncias e indutâncias parasitas não modeladas na simulação, que perturbam o casamento de impedância e deslocam ligeiramente as frequências de ressonância. Simulações geralmente consideram apenas o *patch*, o substrato e a linha de alimentação idealizada. Na prática, o conector SMA e a soldagem são inevitáveis e introduzem efeitos parasitas que explicam diferenças entre os resultados simulados e medidos;
- Perdas não idealizadas no modelo: o modelo de simulação utiliza valores nominais para as propriedades do substrato e do cobre, enquanto na prática ocorrem variações locais de espessura, rugosidade superficial e condutividade. Valores nominais vs. reais: na simulação, o substrato FR-4 e o cobre são considerados com propriedades constantes (espessura, permissividade, condutividade). Na prática, há variações de lote para lote e até dentro da mesma placa.

Espessura do cobre: pequenas diferenças na espessura afetam a resistência e, portanto, as perdas ôhmicas.

Rugosidade superficial: o cobre real não é perfeitamente liso; a rugosidade aumenta a resistência de superfície e gera perdas adicionais em altas frequências.

Condutividade efetiva: impurezas e variações locais reduzem a condutividade em relação ao valor ideal usado na simulação.

Substrato FR-4: a permissividade relativa (ϵ_r) e o fator de perdas ($\tan \delta$) variam com a frequência, temperatura e até mesmo entre fabricantes, o que altera o casamento de impedância e a largura de banda.

Apesar dessas discrepâncias, a proximidade entre os resultados simulados e experimentais — com desvios máximos inferiores a 6% nas frequências de ressonância — valida o modelo computacional proposto e confirma a adequação da metodologia de projeto e fabricação adotada.

4.3 Síntese dos Resultados

A comparação entre os resultados simulados e experimentais do protótipo com duas fendas em arco é apresentada nas Tabelas 7 e 8.

Tabela 7 – Comparação entre resultados simulados e medidos — antena com duas fendas.

Parâmetro	Simulado	Medido
1ª frequência de ressonância	2,12 GHz	2,01 GHz
S_{11} mínimo (1ª banda)	−16,73 dB	−15,03 dB
VSWR mínimo (1ª banda)	1,59	1,43
Largura de banda (1ª banda)	≈ 30 MHz	≈ 50 MHz
2ª frequência de ressonância	5,05 GHz	5,13 GHz
S_{11} mínimo (2ª banda)	−30,84 dB	−18,86 dB
VSWR mínimo (2ª banda)	0,83	1,25
Largura de banda (2ª banda)	≈ 140 MHz	≈ 120 MHz

Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

Tabela 8 – Comparação entre resultados do desvio de ressonâncias simulados e medidos — antena com duas fendas.

Parâmetro	Simulado	Medido
Desvio na 1ª ressonância		$\approx 5,19\%$
Desvio na 2ª ressonância		$\approx 1,58\%$

Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

Os resultados demonstram que a configuração com duas fendas é a mais eficiente entre as investigadas, pois além de possibilitar operação multibanda em aproximadamente 2 GHz e 5 GHz, manteve níveis adequados de adaptação de impedância — com VSWR < 2 em ambas as bandas tanto em simulação quanto em medição. A configuração com fenda à direita, alcançou o critério mínimo de $S_{11} \leq -10$ dB nas frequências bem próximas à da antena com a fenda do lado esquerdo.

As duas bandas de operação obtidas — em torno de 2 GHz e 5 GHz — têm relevância prática direta para sistemas de comunicação sem fio modernos. A banda inferior é compatível com redes Wi-Fi 2,4 GHz (IEEE 802.11b/g/n), sistemas Bluetooth e aplicações IoT. A banda superior é compatível com redes Wi-Fi 5 GHz (IEEE 802.11a/n/ac/ax) e potencialmente com aplicações em sistemas IMT-2020 (5G sub-6 GHz) (JANARTHANAN et al., 2024; BHATT; MAKWANA, 2024; TIANG et al., 2024). Isso indica que a técnica de fendas em arco pode ser explorada para o desenvolvimento de antenas compactas e multibanda de aplicação prática em sistemas de comunicação sem fio de geração atual e futura.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho apresentou um estudo sistemático e experimental sobre o impacto da inserção de fendas em arco — nas configurações simples (à esquerda e à direita) e dupla — no parâmetro S_{11} de antenas *patch* circulares, projetadas para a frequência de 2,4 GHz sobre substrato FR-4. A investigação envolveu dimensionamento analítico, simulações eletromagnéticas em plataforma de onda completa no HFSS, fabricação de protótipo por corte CNC a laser e caracterização experimental com o LiteVNA-64.

O ponto de partida foi uma antena *patch* circular convencional com raio $R \approx 16,98$ mm, sobre substrato FR-4 ($\epsilon_r = 4,4$, $h = 1,5$ mm) e alimentada por transformador de $\lambda/4$. A configuração de referência apresentou ressonância em 2,42 GHz ($S_{11} = -37$ dB) e uma segunda ressonância em 4,84 GHz ($S_{11} = -14$ dB), confirmando a precisão do dimensionamento analítico e do modelo computacional.

A análise comparativa das quatro configurações simuladas revelou comportamentos distintos conforme a posição e o número de fendas:

- A configuração com fenda à esquerda habilitou operação em três bandas: 2,38 GHz ($S_{11} = -15,66$ dB), 4,62 GHz ($S_{11} = -12,10$ dB) e 5,41 GHz ($S_{11} = -11,45$ dB), todas satisfazendo o critério de $S_{11} \leq -10$ dB;
- A análise da antena *patch* circular com fenda lateral direita evidenciou resultados consistentes e promissores. As simulações mostraram três pontos de ressonância bem definidos, com valores de $S_{11} \leq -10$ dB, referentes à antena com a fenda à esquerda, indicando boa adaptação de impedância e eficiência na transmissão e recepção. Essa configuração demonstrou capacidade de operar em múltiplas bandas, ampliando o potencial de aplicação em sistemas de comunicação sem fio.
- A configuração com duas fendas apresentou o melhor desempenho multibanda, com ressonâncias em 2,12 GHz ($S_{11} = -16,73$ dB) e 5,05 GHz ($S_{11} = -30,84$ dB), com larguras de banda de aproximadamente 30 MHz e 140 MHz, respectivamente.

A fabricação do protótipo com duas fendas confirmaram o comportamento multibanda previsto pela simulação. Os resultados medidos indicaram ressonâncias em 2,01 GHz ($S_{11} = -15,03$ dB) e 5,13 GHz ($S_{11} = -18,86$ dB), com larguras de banda de 50 MHz e 120 MHz e VSWR de 1,43 e 1,25, respectivamente. Os desvios percentuais entre simulação e medição foram de 5,19% para a primeira frequência e 1,58% para a segunda — valores compatíveis com as tolerâncias esperadas em processos de fabricação artesanal e com as incertezas inerentes às propriedades do substrato FR-4.

5.1 Principais Contribuições

Este trabalho contribui em múltiplas dimensões para o campo de pesquisa em antenas de microfita:

Contribuição científica: A análise sistemática e experimental do impacto de fendas em arco em quatro configurações distintas de uma mesma antena *patch* circular preenche uma lacuna identificada na literatura ao demonstrar, de forma quantitativa, como a posição e o número de fendas influenciam o parâmetro S_{11} e o comportamento em frequência. O resultado de que a fenda à direita — com geometria idêntica à fenda à esquerda, apenas espelhada — produz ressonâncias com $S_{11} \leq -10$ dB com valores muito próximos em relação a antena com fenda do lado esquerdo.

Contribuição tecnológica: O trabalho demonstra a viabilidade do processo de fabricação por CNC a laser no FABLAB/CAMTUC para a produção de protótipos de antenas de microfita com geometrias complexas — fendas em arco com raio de 11,9 mm e largura de 1,73 mm — obtendo resultados experimentais com boa concordância com a simulação. Esse processo representa uma alternativa mais precisa e reprodutível em relação à corrosão química artesanal.

Contribuição didático-científica: A abordagem metodológica do dimensionamento analítico à validação experimental, seguida neste trabalho constitui um referencial prático para pesquisas futuras em antenas de microfita no CAMTUC/UFGA, contribuindo para a consolidação do grupo de pesquisa em antenas e propagação.

Contribuição para divulgação científica: Os resultados deste trabalho foram consolidados, submetidos e aprovados para publicação no XXII Simpósio Brasileiro de Micro-ondas e Optoeletrônica (SBMO 2026), (TELES et al., 2026), refletindo o reconhecimento da relevância científica da pesquisa realizada pela comunidade científica nacional.

5.2 Comparação com a Literatura

Os resultados obtidos são consistentes com as tendências observadas na literatura recente. Bhatt e Makwana (2024) reportaram que fendas em *patches* circulares deslocam a frequência de ressonância e habilitam operação multibanda, o que é confirmado pelos resultados deste trabalho para todas as configurações com fendas que satisfizeram o critério de $S_{11} \leq -10$ dB. Kashyap et al. (2022) e Tewary et al. (2023) verificaram que a inserção de fendas amplia a largura de banda efetiva da antena — resultado também observado neste trabalho, onde a configuração com duas fendas apresentou largura de banda de 140 MHz na segunda ressonância, superior à banda estreita da antena de referência. Birwal, Patel e Singh (2024) demonstraram que a posição da fenda em relação ao ponto de alimentação é determinante para o casamento de impedância em *patches* circulares, em alinhamento direto com o resultado mais expressivo deste trabalho: a simetria entre o desempenho das

configurações com fenda à esquerda e com fenda à direita.

A obtenção de comportamento multibanda nas faixas de 2 GHz e 5 GHz, por meio de uma estrutura plana de baixo custo sobre substrato FR-4, coloca a antena proposta como candidata viável para aplicações em sistemas Wi-Fi 802.11b/g/n (2,4 GHz) e 802.11a/n/ac (5 GHz), bem como em dispositivos IoT que operam simultaneamente em ambas as faixas — resultado em consonância com as demandas identificadas por Janarthanan et al. (2024) e Tiang et al. (2024).

5.3 Limitações do Trabalho

Algumas limitações foram identificadas ao longo do desenvolvimento e devem ser consideradas na interpretação dos resultados:

- As propriedades elétricas do substrato FR-4 (ϵ_r e $\tan \delta$) apresentam variações entre lotes e fornecedores que não foram caracterizadas individualmente para a placa utilizada, o que contribui para os desvios entre simulação e medição;
- O modelo de simulação não incluiu a modelagem detalhada do conector SMA nem dos fios de soldagem, o que pode explicar parte das discrepâncias observadas;
- As medições de diagrama de irradiação e ganho não foram realizadas neste trabalho por limitação de equipamentos e infraestrutura, de modo que os resultados experimentais se restringem aos parâmetros S_{11} e VSWR;
- A análise se limitou às quatro configurações propostas, não explorando sistematicamente outros valores de raio, ângulo central ou largura das fendas.

5.4 Perspectivas de Trabalhos Futuros

Os resultados obtidos abrem um conjunto de direções promissoras para pesquisas futuras:

- a) Análise paramétrica das fendas: Investigar sistematicamente a influência do raio (R_s , R_d), do ângulo central (θ_s , θ_d), da largura (W_c) e da separação entre fendas (D_c) no S_{11} e na largura de banda, utilizando varreduras paramétricas no HFSS; Otimização computacional: Empregar algoritmos de otimização — como algoritmos genéticos, *Particle Swarm Optimization* (PSO) ou aprendizado de máquina — para maximizar simultaneamente a largura de banda e o ganho nas duas faixas de operação (KUMAR; RAY, 2003); Substratos de menor perda: Avaliar o desempenho da configuração com duas fendas sobre substratos como Rogers RT/duroid 5880 ou RO4003C, com menor $\tan \delta$, visando ampliar a eficiência de radiação e reduzir o desvio entre simulação e medição;

- b) Medição de diagrama de irradiação e ganho: Realizar a caracterização completa do protótipo, incluindo o diagrama de irradiação nos planos E e H , o ganho e a eficiência de irradiação, para complementar os resultados experimentais aqui apresentados;
- c) Avaliar a influência do deslocamento da fenda em arco em direção à borda do *patch* circular sobre o comportamen

Investigar estratégias de otimização da geometria da fenda em arco visando o controle independente das frequências de ressonância, permitindo o deslocamento de uma banda de operação sem alterar significativamente a outra.

Portanto, os resultados deste trabalho demonstram que fendas em arco constituem uma técnica simples, eficaz e de baixo custo para o projeto de antenas *patch* circulares multibanda. A configuração com duas fendas, em particular, revelou-se capaz de habilitar operação nas faixas de 2 GHz e 5 GHz a partir de uma única estrutura plana sobre substrato FR-4, com bom casamento de impedância em ambas as bandas e boa concordância entre simulação e medição experimental. Esses resultados reforçam o potencial da abordagem investigada para atender às crescentes demandas de conectividade multibanda dos sistemas de comunicação sem fio modernos, ao mesmo tempo em que confirmam a capacidade instalada do CAMTUC/UFGA para a pesquisa, fabricação e caracterização de antenas de microfitas com geometrias avançadas.

REFERÊNCIAS

- ANSYS. *Ansys Electronics Desktop Student*. 2026. Disponível em: <<https://www.ansys.com/academic/students/ansys-electronics-desktop-student>>. Acesso em: 4 mar. 2026. Citado 3 vezes nas páginas 21, 29 e 36.
- BALANIS, C. A. *Antenna Theory: Analysis and Design*. 3. ed. Hoboken, New Jersey: Wiley-Interscience, 2005. Citado na página 32.
- BALANIS, C. A. *Antenna Theory: Analysis and Design*. 4. ed. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2016. Citado 10 vezes nas páginas 19, 20, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30 e 32.
- BHATT, R. V.; MAKWANA, G. D. Slot-loaded dual-band microstrip patch antenna for 5G and WLAN/WiMAX wireless applications. *Indian Journal of Science and Technology*, v. 17, n. 22, p. 2324–2330, 2024. Citado 8 vezes nas páginas 20, 21, 30, 31, 42, 43, 47 e 49.
- BIRWAL, A.; PATEL, K.; SINGH, S. Circular slot-based microstrip circularly polarized antenna for 2.45-GHz RFID reader applications. *IEEE Journal of Radio Frequency Identification*, v. 8, p. 10–18, 2024. Citado 7 vezes nas páginas 19, 20, 21, 26, 31, 43 e 49.
- HOWELL, J. Q. Microstrip antennas. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, v. 23, n. 1, p. 90–93, 1975. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 24.
- JANARTHANAN, S. et al. Advanced miniaturized microstrip patch antenna design for high-efficiency 5G applications. *Measurement Science Review*, v. 24, n. 6, p. 239–243, 2024. Citado 7 vezes nas páginas 19, 20, 21, 22, 26, 47 e 50.
- KASHYAP, P. A. et al. Gain and bandwidth enhancement of slotted microstrip antenna using metallic nanofilms for WLAN applications. *Journal of King Saud University — Science*, v. 35, p. 102374, 2022. Citado 7 vezes nas páginas 20, 21, 30, 31, 42, 43 e 49.
- KUMAR, G.; RAY, K. P. *Broadband Microstrip Antennas*. Boston: Artech House Publishers, 2003. Citado 6 vezes nas páginas 19, 20, 21, 24, 25 e 50.
- LACERDA, D. C.; JUNIOR, A. C. dos S. *Projeto e construção de antena de microfita para sistema móvel celular*. Brasília, DF: [s.n.], 2008. Projeto Final de Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília. Orientador: Antonio José Martins Soares. Citado na página 26.
- MORAIS, J. H. C. de. *Estudo de Antenas Patches de Microfita Miniaturizadas em Banda Larga para Aplicação em Dispositivos Móveis e Portáteis*. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2011. Citado 6 vezes nas páginas 24, 25, 27, 28, 29 e 30.
- MUNSON, R. E. Conformal microstrip antennas and microstrip phased arrays. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, v. 22, n. 1, p. 74–78, 1974. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 24.

- NanoRFE. **NanoVNA V2 Software**. 2025. Disponível em: <<https://nanorfe.com/nanovna-v2-software.html>>. Acesso em: dez. 2025. Citado na página 40.
- SOUZA, H. et al. **Avaliação experimental de técnicas de casamento de impedância em antenas de microfitas *patch* circular**. In: *Proc. XLIII Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais (SBrT)*. Natal, RN: [s.n.], 2025. p. 1–3. Citado 4 vezes nas páginas 19, 26, 33 e 42.
- TELES, L. A. B. et al. **Impacto de Fendas em Arco Simples e Dupla no Parâmetro S_{11} de Antenas *Patch* Circulares**. In: *XXII Simpósio Brasileiro de Micro-ondas e Optoeletrônica (SBMO 2026)*. Gravatá, PE, Brasil: [s.n.], 2026. Citado na página 49.
- TEWARY, T. et al. Wide band microstrip patch antenna with enhanced gain using FSS structure. *Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications*, v. 22, n. 2, p. 329–345, 2023. Citado 6 vezes nas páginas 20, 21, 25, 31, 43 e 49.
- TIANG, J. J. et al. Design of novel microstrip patch antenna for millimeter-wave B5G communications. *Frontiers in Materials*, v. 11, p. 1364159, 2024. Citado 7 vezes nas páginas 19, 20, 21, 22, 26, 47 e 50.
- WONG, K.-L. **Compact and Broadband Microstrip Antennas**. New York: Wiley-Interscience, 2002. Citado na página 19.
- ZÜRCHER, J. F.; GARDIOL, F. E. **Broadband Patch Antennas**. Boston: Artech House Publishers, 1995. Citado 3 vezes nas páginas 19, 20 e 28.