

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA DE SÃO JOÃO DA BOA VISTA
BACHARELADO EM ENGENHARIA ELETRÔNICA E DE TELECOMUNICAÇÕES

LARISSA REJANE FRENHAN

MINIATURIZAÇÃO DE ANTENAS PARA APLICAÇÕES EM AERONAVES
REMOTAMENTE PILOTADAS (RPAS)

SÃO JOÃO DA BOA VISTA

2023

LARISSA REJANE FRENHAN

MINIATURIZAÇÃO DE ANTENAS PARA APLICAÇÕES EM AERONAVES
REMOTAMENTE PILOTADAS (RPAS)

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” como requisito para obtenção de título de Bacharel em Engenharia Eletrônica e de Telecomunicações.

Orientador: Prof. Dr. Rafael Abrantes Penchel

SÃO JOÃO DA BOA VISTA

2023

F878m Frenhan, Larissa Rejane
Miniaturização de Antenas para aplicações em Aeronaves Remotamente pilotadas(RPAS) / Larissa Rejane Frenhan. -- São João da Boa Vista, 2023
50 p.

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Engenharia de Telecomunicações) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Engenharia, São João da Boa Vista
Orientador: Rafael Abrantes Penchel

1. Antenas (Eletrônica). 2. Linhas de transmissão em fita. 3. Simulação (Computadores). 4. Telecomunicações. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Faculdade de Engenharia, São João da Boa Vista. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

LARISSA REJANE FRENHAN

MINIATURIZAÇÃO DE ANTENAS PARA APLICAÇÕES EM AERONAVE
REMOTAMENTE PILOTADA (RPAS)

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” como requisito para obtenção de título de Bacharel em Engenharia Eletrônica e de Telecomunicações.

Orientador: Prof. Dr. Rafael Abrantes Penchel

Data de aprovação: 28/06/2023

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE SÃO JOÃO DA BOA VISTA
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELETRÔNICA E DE TELECOMUNICAÇÕES

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**MINIATURIZAÇÃO DE ANTENAS PARA APLICAÇÕES EM AERONAVE
REMOTAMENTE PILOTADA**

Aluna: Larissa Rejane Frenhan

Orientador: Prof. Dr. Rafael Abrantes Penchel

Banca Examinadora:

- Rafael Abrantes Penchel (Orientador)
- Ivan Aritz Aldaya Garde (Examinador)
- Renan Alves dos Santos (Examinador)

A ata da defesa com as respectivas assinaturas dos membros encontra-se no
prontuário da aluna (Expediente nº 122/2021)

São João da Boa Vista, 28 de junho de 2023.

DEDICATÓRIA

*A Silvio, marido e melhor amigo, pelo amor, pela
dedicação, pela paciência e incentivo dedicados
a mim durante esta etapa na minha vida.*

A Sid, meu melhor amigo.

AGRADECIMENTOS

A Deus, Pai querido e bondoso, rocha e fortaleza, que esteve comigo em todos os momentos da vida, digno de toda Honra e Glória, o único que me privilegia com o ar para respirar, o alimento, fonte de Água Viva, o Deus do impossível, que todos os dias me abençoa com sua misericórdia e Graça, todas imerecidas.

A Silvio, melhor amigo, companheiro e marido, deixo aqui expresso minha sincera gratidão por não me deixar desistir e me incentivar a terminar, por caminhar comigo a ir além das barreiras do TDAH, por superar desafios, compartilhar momentos bons e ruins, por mostrar que o amor vence tudo.

Aos meus pais Maura e Luis Carlos, meu irmão Lucas, por me fazerem ver sempre por uma nova perspectiva, por me ensinarem todo o necessário, pela companhia e preocupação, pelo incentivo e encorajamento.

Aos meus avós, tios e tias, primos e familiares, por me darem forças, momentos divertidos e ensinamentos preciosos.

A minha tia Kátia, por me incentivar e sempre ter as palavras certas, mesmo nos momentos que nem mesmo eu conseguia ver meu valor.

Também deixo aqui expresso minha gratidão aos meus amigos: Sid, Matheus, Luis Antônio, José Carlos, Maria, João e André, por me mostrarem que a amizade verdadeira é leve, bonita e companheira.

Aos funcionários, professores e colaboradores da UNESP-SJBV, por me orientarem quando necessário, além de contribuírem positivamente durante o curso das disciplinas.

Por fim, ao meu professor-orientador, Rafael Penchel, pelo conhecimento ensinado e compartilhado, além do incentivo na realização deste trabalho de conclusão de curso.

RESUMO

Neste trabalho, foi desenvolvida uma antena de microfita retangular para operar nas principais banda ISM que usando a tecnologia Wi-Fi para aplicação em Aeronaves Remotamente Pilotada. Os objetivos propostos são: desenvolver uma antena de microfita retangular omnidirecional UWB (Ultra-Wide Band), empregando o método do plano terra parcial; e, reduzir as dimensões da antena por meio da técnica de inserção de fendas e da suavização das bordas inferiores. Dessa forma, o trabalho foi desenvolvido a fim de encontrar as dimensões do plano terra, raio de arredondamento das bordas, dimensões das fendas e as novas dimensões da antena patch para unir as características desejáveis de operação em banda larga com dimensões reduzidas.

Palavras-chave: *aeronave remotamente pilotada; antena patch retangular; banda larga; miniaturização.*

ABSTRACT

In this work, a rectangular microstrip antenna was developed to operate in the main ISM bands using Wi-Fi technology for application in Remotely Piloted Aircraft. The proposed objectives are: to develop a UWB (Ultra-Wide Band) omnidirectional rectangular microstrip antenna, using the partial ground plane method; and, reduce the dimensions of the antenna through the technique of inserting slits and smoothing the lower edges. In this way, the work was developed to find the dimensions of the ground plane, radius of rounding of the edges, dimensions of the slits and the new dimensions of the patch antenna to unite the desirable characteristics of operation in broadband with reduced dimensions.

Keywords: *miniaturization; rectangular patch antenna; remotely piloted aircraft; wideband.*

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
1.1 MOTIVAÇÃO E JUSTIFICATIVA	10
1.2 OBJETIVO	11
1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	11
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	13
2.1 BREVE HISTÓRICO E DEFINIÇÃO.....	13
2.2 CONSTITUIÇÃO DE UMA ANTENA <i>PATCH</i>	13
2.3 MODELOS DE ANTENA <i>PATCH</i>	15
2.4 ANTENA <i>PATCH</i> RETANGULAR	16
2.4.1 CASAMENTO DE IMPEDÂNCIA EM BANDA ESTREITA	17
2.5 SUBSTRATOS PARA ANTENA <i>PATCH</i>	18
2.6 MÉTODO DE ALIMENTAÇÃO POR <i>MICROSTRIP</i>	21
2.7 ANTENAS UWB	22
2.8 TÉCNICAS DE MINIATURIZAÇÃO	23
2.8.1 ADIÇÃO DE FENDAS NA ANTENA	23
2.8.2 PLANO TERRA PARCIAL.....	24
2.9 AERONAVES REMOTAMENTE PILOTADAS	24
2.9.1 ALGUMAS APLICAÇÕES DE RPAS.....	27
A) PULVERIZAÇÃO	27
B) MONITORAMENTO	27
3 RESULTADOS E DISCUSSÕES	28
3.1 DESIGN INICIAL DA ANTENA <i>PATCH</i> RETANGULAR COM ALIMENTAÇÃO.....	28
3.2 REDUÇÃO DO COMPRIMENTO DO PLANO TERRA	33
3.3 ARREDONDAMENTO DAS BORDAS INFERIORES DA ANTENA	35
3.4 INSERÇÃO DE FENDAS NA ANTENA	38
4 CONCLUSÃO	46

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Antena de <i>microstrip</i> retangular.....	14
Figura 2. Ilustração da vista lateral da antena de <i>microstrip</i>	15
Figura 3. Geometrias do patch de <i>microstrip</i>	16
Figura 4. Representação das fendas inseridas na antena patch para o casamento de impedância com a linha de alimentação.	18
Figura 5. Ilustração sem escala de formação de campos nas bordas.	20
Figura 6. Sistema de Aeronave Remotamente Pilotada.	25
Figura 7. Funcionamento do enlace da RPAS.....	26
Figura 8. Desenho da vista superior da antena patch retangular no seu design inicial completo.	29
Figura 9. Análise paramétrica comprimento da fenda na antena de banda estreita.	30
Figura 10. S11 da antena patch após o casamento de impedância. Percentual de banda de 4%.	30
Figura 11. Componente real e imaginário da impedância de entrada da antena.....	31
Figura 12. Visão isométrica da antena sobreposta pelo diagrama de radiação 3D.	32
Figura 13. Diagrama de radiação de ganho em 2D da antena patch retangular no design inicial na frequência de 2.5 GHz. Planos E e H.	32
Figura 14. Antena patch retangular com plano terra reduzido.....	33
Figura 15. Análise paramétrica comprimento do plano terra.	34
Figura 16. Módulo de S11 (dB) da antena com plano terra de 9.3mm de comprimento. Percentual de banda de 25%.	34
Figura 17. Diagrama de radiação de ganho da antena com plano terra parcial em 2,5 GHz. Planos E e H. Máximo ganho de 3.1 dB na direção de 188° no Plano E.	35
Figura 18. Antena <i>patch</i> retangular com bordas inferiores arredondadas – Vista sobreposta.	36

Figura 19. Análise paramétrica com o raio do arredondamento das bordas da antena.....	37
Figura 20. Análise paramétrica com o raio do arredondamento das bordas da antena, refinando o passo para 0,3 mm.....	37
Figura 21. Módulo de S11 (dB) da antena com raio de 23.3mm. Percentual de banda total de 100%.....	38
Figura 22. Vista superior da antena com a inserção das fendas laterais.....	39
Figura 23. Análise paramétrica da profundidade da fenda.....	39
Figura 24. Análise paramétrica do comprimento da fenda (parâmetro L_{slit} da Figura 22).	40
Figura 25. Análise paramétrica do comprimento da antena mantendo a largura fixa em 47,4mm.	41
Figura 26. Análise paramétrica das dimensões de comprimento e largura da antena. Comprimento da antena fixo em 40mm.	41
Figura 27. Antena com as dimensões reduzidas.....	42
Figura 28. Módulo de S11 da antena com largura reduzida de 47,4mm para 38,5mm. Percentual de banda de 46%.....	43
Figura 29. Diagrama de radiação de ganho da antena em 2,5 GHz. Planos E e H.	44
Figura 30. Diagrama de radiação de ganho da antena em 5,8 GHz. Planos E e H.	44
Figura 31. Diagrama de radiação de ganho da antena em 6,5 GHz. Planos E e H.	45

1 INTRODUÇÃO

1.1 MOTIVAÇÃO E JUSTIFICATIVA

Impulsionado pelos conflitos armados que assolaram o século XX e avanços em programas espaciais, os sistemas de aeronaves remotamente pilotadas (RPAS – *Remotely Piloted Aircraft System*) surgiram com o objetivo principal de atacar alvos a distâncias consideráveis sem colocar em risco os pilotos. Por serem de tamanho reduzido, possuem sistemas eletrônicos e aviônicos, o que os torna fáceis de manuseio, além de seguir os mesmos padrões de segurança, confiabilidade e desempenho que os aviões tripulados (VULEJ,2016). Posteriormente, estes dispositivos migraram para outras áreas, e o Brasil é um dos pioneiros a fazer uso desta tecnologia na agricultura. O enlace do RPAS opera por meio de um link de rádio digital, e é o responsável pelo transporte de informações entre dois pontos fixos via transmissão sem fio, sendo esta informação de formato digital e através de canais padronizados.

Outra tecnologia que adquiriu grande notoriedade neste mesmo período histórico, são os transceptores de rádio incorporados a dispositivos móveis e portáteis, os RPAS, possibilitando acesso a variados sistemas de comunicação sem fio, mostra a importância do desenvolvimento de mais tecnologias que possam suprir este mercado e linha de pesquisa. Esse segmento de tecnologias *wireless* apresentou-se como uma solução robusta incorporada na agricultura 4.0, principalmente devido a operabilidade em diversas frequências, sendo bastante explorada em enlaces de rádio digital devido ao alcance, flexibilidade, entre outros.

As antenas *patch* alcançaram relevância, tanto no meio industrial como no meio acadêmico, neste mesmo período da revolução armada devido ao baixo custo, compatibilidade com superfícies diversas, facilmente adaptáveis e volume pequeno, este dispositivo passivo é utilizado em larga escala em satélites e RPAS. Essa classe de antenas possui como vantagens: destreza de confecção e baixo custo de fabricação, contribuindo para sua produção em larga escala, além de ser facilmente adaptável a estruturas aerodinâmicas. Contudo, a banda de operação e a baixa eficiência de irradiação são suas principais desvantagens. A fim de reduzir estes agravos, existem abundantes substratos que podem ser utilizados para o projeto de antenas de *microstrip*.

Para um bom desempenho da antena, substratos mais espessos proporcionam maior largura de banda (BALANIS,2005). Por serem integradas à outros circuitos de radiofrequência,

é fundamental a combinação do *design* do circuito e o bom desempenho da antena. Além da prática em sistemas de comunicação, estas também se apresentam como funcionais em campos em que o peso é um fator preponderante, tais como aeronaves e satélites.

Outra tecnologia desenvolvida para auxílio de dispositivos militares, foi a criação de antenas de banda ultra larga ou UWB (*Ultra Wide Band*), e tais dispositivos são designados especificamente para transmitir e receber informações por meio de energia eletromagnética de pulso de tempo de duração muito curtos. Esta abordagem, é tida como revolucionária para sistemas de comunicação sem fio, em que o tempo para a distribuição de informação e a alta velocidade são significativamente importantes para o avanço das tecnologias em telecomunicações.

A curiosidade pela integração entre essas tecnologias tão fascinantes, antenas *patch*, dispositivos de UWB e RPAS, é o principal incentivo pelo qual foi escolhido para estudo, análise e desenvolvimento deste trabalho de conclusão de curso.

1.2 OBJETIVO

O objetivo geral do presente trabalho é o estudo das antenas de *microstrip*, envolvendo seu funcionamento e métodos de análise. O foco principal foi voltado para antenas *patch* retangulares com alimentação por linha de *microstrip*.

Posteriormente, como objetivo específico, propõe desenvolver o projeto de antena UWB (*Ultra Wide Band*) omnidirecional, capaz de operar nas bandas de ISM 2.4GHz, 5 GHz, 6 GHz (Wi-Fi 6E), frequências estas usualmente utilizadas em sistemas de comunicação sem fio. O software ANSYS HFSS é empregado para verificação e testes dos resultados obtidos. Além disso, são utilizadas técnicas de miniaturização de antenas para redução das dimensões da antena, permitindo a aplicação em RPAS (*Remotely Piloted Aircraft System*).

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O Capítulo 1 introduz o tema abordado e a ser desenvolvido neste trabalho, além dos objetivos principais com os parâmetros necessários que serão analisados no desenvolvimento, resultados e discussões, estes, apresentados mais adiante.

O Capítulo 2 revisa a fundamentação teórica de antenas, antenas *patch*, sistemas UWB e aplicação em RPAS.

O Capítulo 3 mostra o desenvolvimento e o projeto da antena *patch* com plano de terra parcial operando nas frequências 2.5GHz, 5.8GHz e 6GHz, além de mostrar os resultados obtidos das simulações da antena patch com a técnica de miniaturização aplicada.

O Capítulo 4 conclui a monografia.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 BREVE HISTÓRICO E DEFINIÇÃO

A teoria eletromagnética proposta pelo físico e matemático James Clerck Maxwell em 1864, em que desenvolveu as equações fundamentais do eletromagnetismo, sendo conhecidas hoje como as equações de Maxwell (MILLAR,1996), mostra como as ondas eletromagnéticas se comportam em relação aos campos magnético e elétrico.

A partir da década de 70, novos protótipos de antenas de microstrip foram efetivamente elaborados e aplicados, em virtude dos avanços e melhorias nas propriedades mecânicas e térmicas, surgimento de substratos que apresentam baixas perdas e a submissão à novos processos industriais. A partir da década de 80, as pesquisas envolvendo técnicas de miniaturização, aumento na eficiência de antenas planares e otimização foram bastante reivindicadas em virtude da necessidade advinda dos setores de comunicações sem fio e aeroespacial. A partir de então, as antenas de *microstrip* mantém-se presente em aplicações variadas tais como sistemas de comunicação móvel, GPS, sistema de radar e comunicações por satélites (BENJWAL,2011).

Em seu aspecto mais simples, a antena *patch* compõe-se de uma placa de perfil fino condutora sobre um plano terra, estes separados por um substrato dielétrico. Para assegurar que o dielétrico não interfira de maneira prejudicial na radiação do campo eletromagnético, é necessário que a permissividade elétrica relativa do dielétrico seja baixa (CAVALCANTE,2015, Dissertação de Mestrado).

Por desempenharem importante papel em telecomunicações, e detêm de grau de maturidade, possuem variedade de configurações e geometrias diferentes, sendo descritas brevemente a seguir.

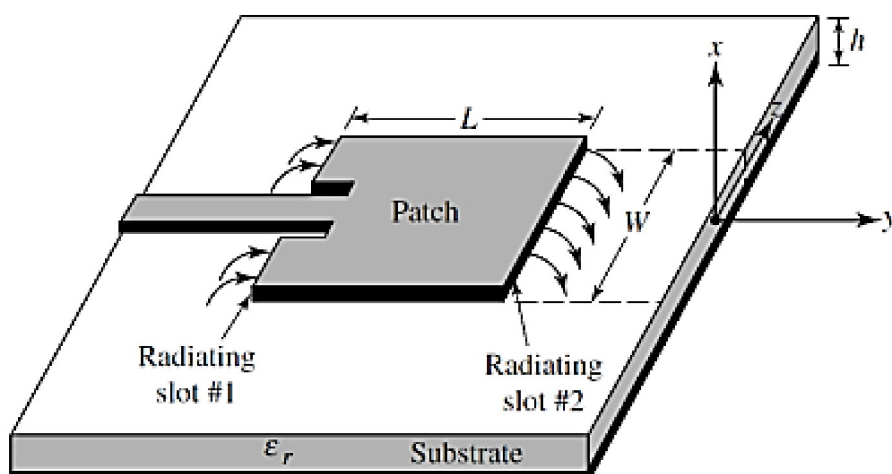
2.2 CONSTITUIÇÃO DE UMA ANTENA *PATCH*

Na maioria das aplicações em drones, como a proposta por esse trabalho, as dimensões e peso dos *hardwares* instalados são críticas, devido a restrições como autonomia da bateria ou de combustível, cada grama pode ser levado em conta. Da mesma forma, a segurança operacional de uma aeronave remotamente pilotada depende da confiabilidade do sistema de comunicação entre RPA e estação de controle em solo. Dessa forma, o desempenho das antenas instaladas na aeronave, associada com as dimensões compactas, é um requisito desejado. As

antenas *patch* são um tipo de antena que atendem bem a demanda desse tipo de aplicação, pois unem dimensões e peso reduzidos com um bom desempenho elétrico.

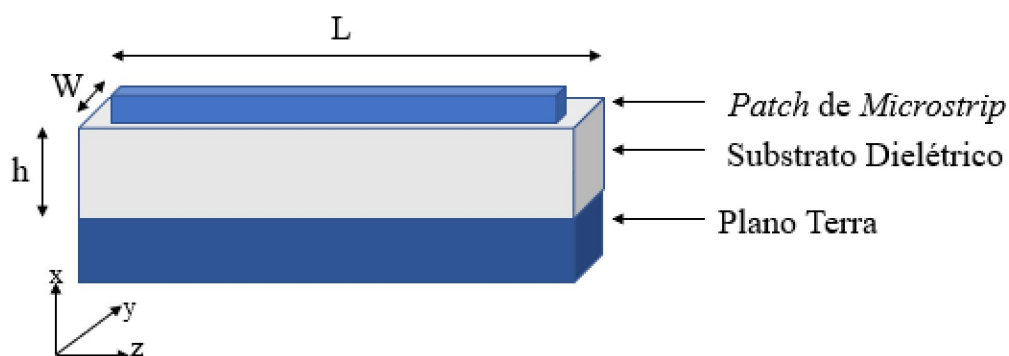
Registros históricos mostram a origem das antenas *patch* de *microstrip* em 1953, nos Estados Unidos (KUMAR; RAY,2003). Já as primeiras utilizações de antenas de *microstrip* são datadas na década de 1970. Tais antenas são constituídas, comumente, duas placas condutoras de forma paralela e separadas por substrato dielétrico, sendo a placa superior à que contém o elemento radiante (*patch*) e a inferior o plano terra, ilustradas pelas Figuras 1 e 2. A estrutura planar metálica encontrada na vista superior, compõem parte de linha de transmissão de *microstrip* ressonante com comprimento de onda mais fino que o comprimento de onda no espaço livre (λ_0) (BALANIS,2005). A camada intermediária é composta por um substrato dielétrico de baixa perda e com espessura h e, assumindo usualmente valores entre $0,003\lambda_0 \leq h \leq 0,05\lambda_0$, com o plano de terra integrando a última face (BALANIS,2005). A estrutura de radiação se manifesta em razão das descontinuidades de cada borda irregular ou cortada da linha de transmissão de *microstrip* (RIBEIRO;KOSSIAVAS,2007). A radiação formada nas bordas aumenta ligeiramente as dimensões elétricas em comparação com as dimensões físicas das antenas. Assim sendo, em certa frequência, seu comprimento é relativamente menor do que meio comprimento de onda.

Figura 1. Antena de *microstrip* retangular.



Fonte: BALANIS, 2005.

Figura 2. Ilustração da vista lateral da antena de microstrip.



Fonte: Elaborado pela autora.

Antena *patch* de *microstrip* de construção mais simples possui um *patch* de $\frac{\lambda}{2}$ comprimento de onda disposto em uma superfície dielétrica e um plano terra. É comum encontrar, antenas comerciais, que tenham plano terra ligeiramente maior que o *patch*, uma vez que, planos terra grandes formam diagramas de radiação estáveis além de possuir baixa sensibilidade às variações no ambiente de operação da antena, todavia isso aumenta as dimensões da antena *patch*.

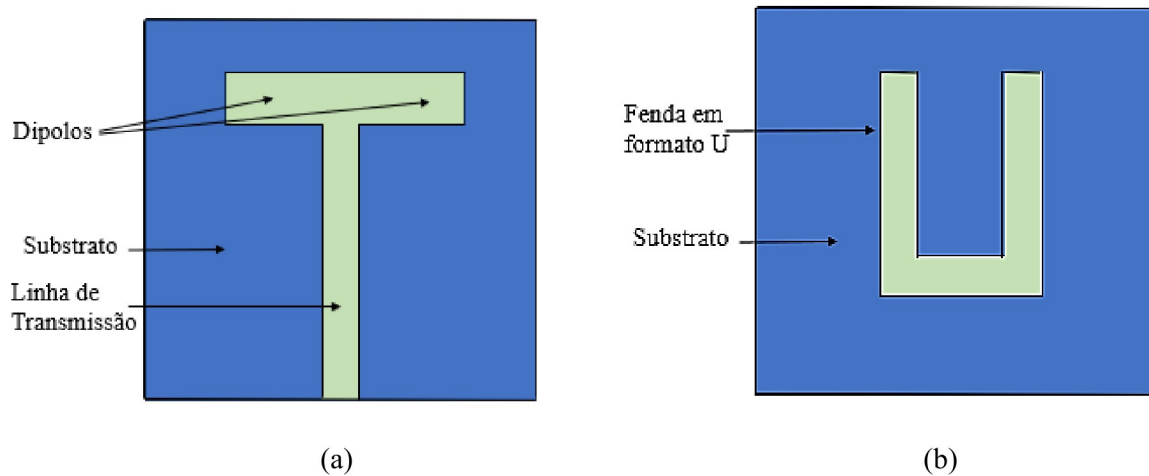
A depender do tipo de configuração, uma antena *patch* pode radiar uma onda linearmente polarizada. A radiação é resultado da corrente fluindo tanto sobre o *patch* (elemento irradiador) como pelo plano terra e é produzida pelas denominadas “fendas radiantes”.

2.3 MODELOS DE ANTENA *PATCH*

Antenas *patch* de *microstrip* apresentam pluralidade de formatos, tais como: retangular, circular, triangular, formato U, ou mesmo combinações destas geometrias. A Figura 3 ilustra possíveis formatos que o elemento irradiador pode assumir. As geometrias mais comuns, utilizando o *patch* retangular ou circular são escolhidas em razão da facilidade de fabricação, análise e mesmo as características de radiação.

A antena *patch* de *microstrip* dipolo também se destaca devido à grande largura de banda e pequeno porte, simplificando a elaboração de arranjos. Polarizações circulares e lineares são obtidas tanto com elementos individuais como em arranjos de antenas. Usualmente, o cobre é utilizado como material para o *patch* e para o plano terra (SILVA,2008).

Figura 3. Geometrias do patch de microstrip.



Fonte: Elaborado pela autora.

É possível utilizar de geometrias com formatos não-convencionais conforme a aplicação, em que o espaço para acoplamento da antena é limitado. A escolha de uma geometria adequada para o *patch* da antena possibilita obter um diagrama de radiação, frequência de ressonância, polarização ou impedância desejados (BALANIS,2005).

2.4 ANTENA *PATCH* RETANGULAR

Para esse trabalho, o formato de antena escolhido foi o retangular, devido ao design simples, fácil fabricação conciliado com bom desempenho elétrico. O formato padrão de uma antena *patch* retangular é conforme a Figura 1.

As dimensões da antena, de comprimento e largura, são dadas respectivamente por 2.1 e 2.2.

$$L = \frac{1}{2f_r \sqrt{\epsilon_{ref}} \sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} - 2\Delta L. \quad (2.1)$$

$$W = \frac{v_0}{2f_r} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad (2.2)$$

Em que f_r é a frequência de ressonância, em Hz, μ_0 e ϵ_0 são respectivamente a permeabilidade magnética no vácuo e a constante dielétrica no vácuo, e v_0 é a velocidade da luz no espaço livre. Ainda, ΔL e ϵ_{ref} são dados por 2.3 e 2.4, respectivamente.

$$\Delta L = 0,412h \frac{(\varepsilon_{ref} + 0,3)\left(\frac{W}{h} + 0,264\right)}{(\varepsilon_{ref} - 0,258)\left(\frac{W}{h} + 0,8\right)}. \quad (2.3)$$

$$\varepsilon_{ref} = \frac{\varepsilon_r + 1}{2} + \frac{\varepsilon_r - 1}{2} \left[1 + 12 \frac{h}{W} \right]^{-\frac{1}{2}}. \quad (2.4)$$

Em que ε_{ref} é a constante dielétrica efetiva e “leva em conta” o efeito do franjamento e a velocidade de propagação da linha de microstrip e ΔL é uma distância em função da constante dielétrica efetiva e da razão entre a largura e espessura (BALANIS,2005).

2.4.1 CASAMENTO DE IMPEDÂNCIA EM BANDA ESTREITA

O método de alimentação da antena depende de vários fatores e dentre eles, a aplicação. Para este projeto, o método de alimentação escolhido é alimentação por microstrip e possui uma seção explicando com maiores detalhes (Seção 2.6). Contudo, em linhas gerais, o método de alimentação por microstrip equivale a uma fita condutora que conecta a fonte ao *patch*.

Sua escolha se deu em razão da simplicidade de fabricação e de casamento de impedância simples. Para tal método de alimentação, destaca-se que o casamento entre a fonte a antena é alcançado através de certas alterações na estrutura, seja a diminuição da linha de alimentação de microstrip, acoplamento de elementos radiantes a ela ou inserção de fendas no *patch*, que é a usada inicialmente neste trabalho (SUN;WU;BAI,2017); (VASCONCELOS;ALBUQUERQUE;FREITASD’ASSUNÇÃO,2013);(WANG;LU,2017).

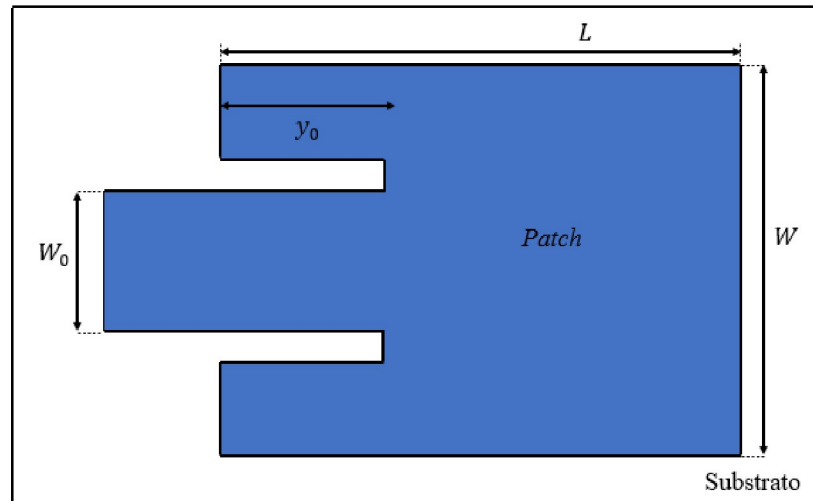
Assim sendo, o acoplamento necessita ser eficiente para transferência de energia entre as partes (*patch* e fonte). Porém, esta conexão pode apresentar perdas por reflexão, por exemplo e sendo capaz de prejudicar o projeto (SUN;WU;BAI,2017); (VASCONCELOS;ALBUQUERQUE;FREITASD’ASSUNÇÃO,2013).

Em projetos de antena *patch* com alimentação de microstrip, tanto a propagação como uma melhor eficiência são alcançadas por fendas, inserção de sonda coaxial, transformadores de impedância e tantas outras técnicas. Para tal projeto, optou-se pela inserção de fendas ou as denominadas reentrâncias.

Como visto, uma técnica comum para o casamento de impedância em banda estreita de uma antena *patch* retangular, é a inserção de reentrâncias conforme a Figura 4. A técnica

consiste em inserir fendas de comprimento y_0 e largura w_0 para casar a resistência de entrada da antena com a impedância da linha de alimentação, que usualmente é de 50Ω .

Figura 4. Representação das fendas inseridas na antena patch para o casamento de impedância com a linha de alimentação.



Fonte: Elaborado pela autora.

Segundo (BALANIS,2005) a largura w_0 usualmente empregada é a mesma largura da linha de alimentação, no caso da linha de microfita, enquanto a dimensão de comprimento é dada isolando y_0 em 2.5.

$$R_{in}(y = 0) = \cos^2\left(\frac{\pi}{L}y_0\right). \quad (2.5)$$

Normalmente o valor obtido de y_0 precisa ser reajustado para um ajuste mais fino de casamento de impedância, conforme desenvolvido na Seção 3.1 deste trabalho.

2.5 SUBSTRATOS PARA ANTENA *PATCH*

O substrato é outro elemento importante para o projeto, além do plano terra e do *patch*, já que é capaz de melhorar o desempenho da antena *patch* quando mais denso, assim as constantes dielétricas são mais baixas, viabilizando maior largura de banda e eficiência. Em razão da maior espessura, há um maior consumo de material, o que torna a fabricação um tanto mais dispendioso. Em contrapartida, substratos mais finos apresentam constantes dielétricas altas, largura de banda mais restrita e é menos eficiente. Possuem maior funcionalidade em circuitos de micro-ondas, devido às menores dimensões do *patch*, o que faz com que haja redução nos acoplamentos indesejáveis e minimiza irradiações (BALANIS,2005).

Altas taxas de homogeneidade e baixas perdas são os atributos fundamentais para um projeto de antena patch de microstrip. Os substratos mais utilizados possuem constantes dielétricas entre 2, $2 \leq \epsilon_r \leq 12$ (BALANIS,2005). São apresentados na Tabela 1 alguns substratos, suas constantes dielétricas e as tangentes de perdas.

Tabela 1 - Materiais dielétricos comerciais e suas características elétricas.

MATERIAIS	CONSTANTE DIELÉTRICA (ϵ_r)	TANGENTE DE PERDAS (tan δ)
FR-4 Epoxi	4,4	0,02
Ferrita	12	0
Duróide(RT/duroid 5880)*	2,20	0,0009

Fontes:<https://rogerscorp.com/-/media/project/rogerscorp/documents/advanced-electronics-solutions/english/data-sheets/rt-duroid-5870---5880-data-sheet.pdf>;

<https://www.micropress.com.br/comparacao-de-laminados/>;

<http://mtc->

mtc-

[m21b.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-](http://mtc-)
[m21b/2014/11.19.18.58/doc/33_%5bARTIGO%5d%5bCSE%5d_patricia.pdf?metadatarpository=&mirror=iconet.com.br/banon/2006/11.26.21.31](http://mtc-)

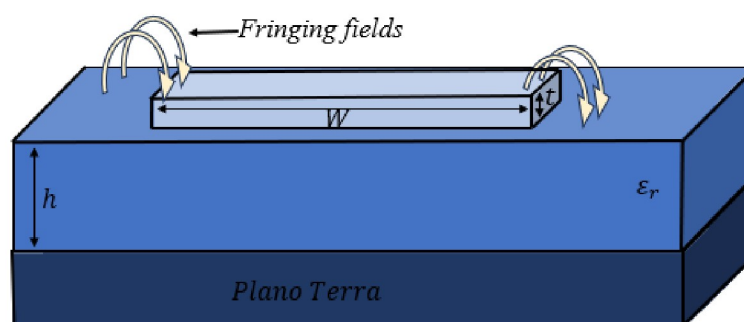
Analisando a Tabela 1, nota-se que quanto maior a permissividade elétrica, simbolizada por ϵ_r , menor é a largura de banda e a eficiência da antena. Com isso, conta-se a influência da variação das propriedades de permissividade elétrica do substrato e a espessura na largura de banda e eficiência de uma antena de *microstrip*. A escolha do material do projeto está vinculada ao substrato e sua espessura bem como com a permissividade elétrica.

O plano de terra é o elemento final que compõe a antena *patch*, auxiliando no confinamento de energia do sistema. Já o substrato é outro componente vital para o desenvolvimento de projeto de antena *patch* e é composto por materiais dielétricos, isto é, possuem propriedades isolantes e podem ser facilmente polarizados, dificultando a formação de corrente elétrica, além de suas propriedades térmicas e mecânicas serem as mesmas em todas as direções. A permissividade elétrica relativa (ou constante dielétrica) ϵ_r do substrato é o parâmetro que dita o tamanho da antena e a largura de banda, além de intervir diretamente na frequência de ressonância (f_r). Os substratos com valores de ϵ_r mais altos possuem largura de banda estreita, baixa eficiência além de tamanho reduzido da antena. Analogamente, quando a

permissividade elétrica relativa assume valores mais baixos ocorre elevação no tamanho da antena, a largura de banda amplia, além do surgimento de radiações indesejáveis e excitações de onda. O emprego de substratos mais espessos com baixa permissividade elétrica se dá a fim de alcançar facilidade de radiação, maior eficiência e largura de banda em antenas de *microstrip*. Substratos estreitos são utilizados em circuitos em micro-ondas com o objetivo de evitar acoplamento e radiação, ocorrendo o confinamento dos campos. A linha de transmissão de microstrip impressa no mesmo substrato é a alimentação mais usual para estas antenas, e a espessura do material demanda cuidado, uma vez que, se mais denso, contribui para o surgimento de ondas de superfície que modificam a potência disponível para a radiação direta, há expansão da radiação espúria da linha, desfavorecendo o diagrama de radiação e consequentemente, outros parâmetros da antena (BALANIS,2005).

Pela perspectiva de sua atuação na transmissão, a operação de uma antena de *microstrip* se dá no momento em que a antena recebe sinal de RF, o *patch* é agitado fazendo com que uma distribuição de carga permaneça na seção de contato com o substrato. Proporcionalmente, o plano de terra também é agitado, obedecendo a intermitência de carga positiva e negativa, ou seja, no instante em que o plano de terra está carregado positivamente, o *patch* está negativamente. Este fato se dá em razão da corrente que alimenta o circuito ser alternada, contribuindo para a retenção de cargas entre o *patch* e o plano de terra, a depender do ϵ_r do material dielétrico. No entanto, como as dimensões da antena são finitas, há formação de campos nas bordas, denominado de *Fringing fields* (ou franjamento), em que parte das cargas contidas no *patch* se extraviam para as bordas por ação da força de repulsão entre elas (BALANIS,2005), como ilustrado pela Figura 5.

Figura 5. Ilustração sem escala de formação de campos nas bordas.



Fonte: Elaborado pela autora.

Para o desenvolvimento das simulações do projeto de antena *patch* com alimentação de *microstrip*, uma das técnicas empregadas para a redução da antena é o plano terra parcial ou truncamento do plano terra, sendo está uma técnica aplicada sob objetivo de aumentar a banda das antenas (BALANIS,2005). Tal modificação ocasiona em alterações de certos parâmetros da antena, tais como padrão de radiação omnidirecional e frequência de ressonância (KOOHESTANI,2011).

2.6 MÉTODO DE ALIMENTAÇÃO POR *MICROSTRIP*

Por mérito de sua maleabilidade, há uma variedade de técnicas que podem ser aplicadas para alimentar a antena, sendo classificadas em forma indireta e direta. A estrutura de alimentação indireta (não há contato metálico entre as partes) é realizada através de acoplamento por proximidade ou acoplamento por abertura, já a forma direta (há contato metálico entre as partes), usualmente é por cabo coaxial ou linha de *microstrip*. A escolha do método leva em consideração a aplicação do projeto da antena, além da largura de faixa de operação, máximo de eficiência na transferência de potência entre a alimentação e o *patch*, as dimensões, minimização de radiação espúria e o casamento de impedância (BALANIS,2005). A próxima subseção é dedicada a apresentar a estrutura de alimentação utilizada para o projeto da antena tratada neste trabalho.

Esta técnica de alimentação abordada é desempenhada através de uma linha de *microstrip* sendo esta, uma fita condutora de largura muito menor que a do *patch*. A fita condutora é estampada sobre o mesmo plano do substrato que a antena, o que é vantajoso dado que viabiliza à estrutura planar, conforme mostrado anteriormente pelas Figuras 1 e 2.

Para este tipo de alimentação, há radiações indesejadas e ampliação de ondas de superfície com a adição de espessura do substrato. No entanto, é um método de fácil fabricação, simples modelagem. Para alcançar um bom casamento de impedância, é possível acrescentar uma reentrância na estrutura do *patch*, dispensando o acréscimo de outro componente para integrar a estrutura do casamento (BAHL;BHARTIA,1982). Tanto a linha de alimentação de microfita como o cabo coaxial possuem assimetrias inerentes que geram modos de ordem superior e que produzem radiação polarizada (BALANIS,2005).

A largura da linha de *microstrip* e a impedância são parâmetros que podem ser calculados de maneira analítica. A largura da linha, usualmente denominada de W e a altura do substrato, usualmente denominada de h , enquanto L é usualmente denominada de comprimento

da linha de *microstrip*. Quando a largura da linha é inferior à altura do substrato, na razão de $\frac{W}{h} < 1$, tanto a permissividade efetiva quanto a impedância característica podem ser determinadas conforme as equações (2.6) e (2.7) (BALANIS,2005):

$$Z_0 = \frac{60}{\varepsilon_{eff}^{1/2}} \ln \left(\frac{8h}{W} + 0,25 \frac{W}{h} \right) \quad (2.6)$$

onde,

$$\varepsilon_{eff} = \frac{\varepsilon_r + 1}{2} + \frac{\varepsilon_r - 1}{2} \left[\left(1 + \frac{12h}{W} \right)^{-1/2} + 0,0041 \left(1 - \frac{W}{h} \right)^2 \right] \quad (2.7)$$

Para o caso contrário, quando $\frac{W}{h} \geq 1$, o cálculo da impedância característica e da permissividade efetiva é determinado de acordo com as equações (2.8) e (2.9) (BALANIS,2005):

$$Z_0 = \frac{120\pi}{\varepsilon_{eff}^{1/2} \left[\frac{W}{h} + 1,393 + 0,667 \ln \left(\frac{W}{h} + 1,4444 \right) \right]} \quad (2.8)$$

onde,

$$\varepsilon_{eff} = \frac{\varepsilon_r + 1}{2} + \frac{\varepsilon_r - 1}{2} \left(1 + \frac{12h}{W} \right)^{-1/2} \quad (2.9)$$

2.7 ANTENAS UWB

Antenas UWB são projetadas para a transmissão e recepção de energia eletromagnética de pulsos eletrônicos extremamente curtos, na escala de tempo, na ordem de 1ns de duração (GHAVAMI;MICHAEL;KOHNO,2004 e ISIDRO,2005). Usualmente, antenas são dispositivos ressonantes que operam em banda de frequência estreita.

A largura de banda de uma antena pode ser entendida como a faixa de operação em frequência em que a antena pode operar garantindo um desempenho dentro do especificado. O desempenho pode levar em conta diferentes critérios de desempenho, que podem ser avaliados por meio do casamento de impedância, como o *Return Loss* / módulo do parâmetro S11, ou diretamente relacionados a eficiência da antena, como a eficiência de radiação ou ganho. Dessa forma, nesse contexto as antenas de banda larga podem ser entendidas como antenas que

operam em uma ampla faixa de frequências dentro de critérios de desempenho estabelecidos. Para esse trabalho, o desempenho da antena foi avaliado em termos do casamento de impedância relativo a 50Ω , utilizando-se como referência o parâmetro o módulo de $S_{11} < -10$ dB.

As antenas de banda larga têm como uma das principais características desejáveis a sua flexibilidade oferecida pela ampla faixa de frequências de operação, que pode ser empregada para o uso de diversas tecnologias ou mesmo em aplicações que exigem grande escalabilidade de hardware, como os rádios definidos por software, amplamente usado em drones. Neste trabalho, foi proposto o desenvolvimento de uma antena patch retangular com operação nas faixas de Wi-Fi 2.4GHz, 5.8GHz e Wi-Fi 6, com operação na faixa de 6 a 7 GHz.

A técnica de plano terra parcial foi aplicada no projeto para transformar uma antena patch retangular de banda estreita em uma antena de banda larga. Esta técnica permite o casamento de impedância em uma ampla faixa de frequências conciliando com uma alta eficiência de radiação (YADAV;BAUDHA,2013). Esta técnica em conjunto com a aplicação do arredondamento das bordas inferiores da antena, permitiu o casamento de impedância da antena para todas as bandas de interesse.

2.8 TÉCNICAS DE MINIATURIZAÇÃO

Antenas *patch* convencionais tem suas dimensões próximas a meio comprimento de onda da frequência de operação para qual ela foi projetada. A depender da aplicação, essas dimensões necessitam ser reduzidas para se adequar ao projeto. As técnicas de miniaturização são uma solução promissora para tal propósito.

A subseção a seguir descreve as técnicas de miniaturização de antena *patch* utilizada no desenvolvimento do projeto desta monografia.

2.8.1 ADIÇÃO DE FENDAS NA ANTENA

A inovação do desenvolvimento deste trabalho é a aplicação de fendas laterais na antena, com objetivo de obter a redução das dimensões da antena.

A aplicação de fendas na estrutura da antena de microfita pode ser visto como uma forma de aumentar o comprimento elétrico da antena sem aumentar suas dimensões, pois permite uma maior circulação de fluxo de corrente sobre ela. O desafio em questão é de

encontrar o formato, dimensões, quantidade e posições de onde as fendas serão introduzidos na antena (RAKHOLIVA;LANGHNOJA,2017). Após a inserção das fendas é esperado que a curva do módulo de S_{11} seja deslocada, fazendo com que seja necessária uma redução proporcional nas dimensões da antena para que ela continue a operar nas frequências inicialmente projetadas.

2.8.2 PLANO TERRA PARCIAL

Há variações quanto a nomeação desta técnica, podendo também ser encontrada por truncamento ou mesmo redução do plano terra. Para o presente trabalho, será denominado de plano terra parcial.

Está técnica é a retirada do material que compõe o plano terra. É sabido que tal técnica é aplicada e antenas ao qual se deseja alterar o diagrama de radiação por exemplo, ou mesmo alterar outros parâmetros como a largura de banda e diretividade, a Figura 14 ilustra a técnica empregada na simulação de antena.

A partir de simulações realizadas, é notável a melhora no desempenho da antena após esta modificação, no que diz respeito quanto a largura de banda e parâmetro S_{11} , cogitando otimização no casamento de impedância em faixa larga, ao qual pode ser obtido através deste tipo de técnica (JOHN;EVANS;AMMANN.J;MODRO; CHEN,2008). Tais resultados são mostrados em maiores detalhes no Capítulo 3 deste trabalho.

2.9 AERONAVES REMOTAMENTE PILOTADAS

Os sistemas de aeronaves remotamente pilotadas (SARP) são uma classificação de aeronaves não tripuladas, ou seja, controladas remotamente por um piloto em solo através de uma interface (ANAC,2021), ilustrado através das Figuras 6 e 7. Há diversas aplicações para essa modalidade de aeronaves, como agricultura, mineração, missões de vigilância, entre outras.

Figura 6. Sistema de Aeronave Remotamente Pilotada.



Fonte: <https://encryptedtbn2.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcSFDBk1SUjuyzTmcfAwSaOnWFiZEmHgcClvzpfF3WA9m0hHVnf7>.

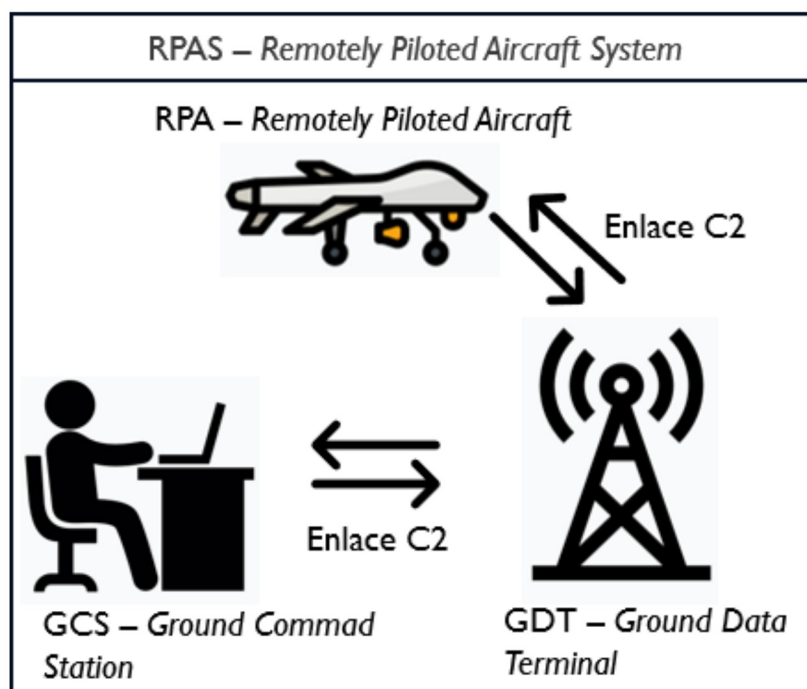
O enlace de comando e controle (C2) é o canal formado entre a aeronave e a estação de controle em solo, e através do qual todas as informações de voo e dados referentes ao controle da aeronave são enviados (ICAO,2017). Esse enlace pode ser classificado em duas categorias:

RLOS (*Radio Line-Of-Sight*): Nesta classificação, o enlace sem fio entre a aeronave e a estação de controle em solo é formado de maneira direta, dentro das limitações de visada de rádio.

BRLOS (*Beyond Radio-Line-Of-Sight*): Nesta condição, o enlace C2 é formado sem visada de rádio, estabelecido através uma infraestrutura que estende o alcance entre a localidade do piloto e a posição da aeronave para condições que não seriam possíveis por meio de uma cobertura direta de rádio. Esta infraestrutura pode ser composta por uma rede de satélites ou pela rede móvel celular (NGUYEN ET AL,2018).

O modo de operação RLOS é amplamente utilizado principalmente em ARPs de pequeno porte e médio porte em que um extenso alcance não é um requisito no projeto, dessa forma, será dado ênfase a esse cenário no presente trabalho.

Figura 7. Funcionamento do enlace da RPAS.



Fonte: Elaborado pela própria autora.

Para o estabelecimento de um enlace C2 (Comando e controle ou, do inglês *command and control*) confiável e com baixa latência, as antenas da aeronave desempenham um importante papel. Um dos principais desafios para um projeto de antena para uma aeronave remotamente pilotada é associar dimensões reduzidas com desempenho aceitável para a frequência de operação. A principal propriedade de radiação de uma antena para essa aplicação é possuir característica omnidirecional, devido a sua característica de receber e enviar sinais em todas as direções, em determinado plano, com ganho uniforme, sendo adequada para atender a dinâmica de voo (YAN;ZHANG;WANG,2019).

As antenas fabricadas em placas de circuito impresso se apresentam como uma solução promissora para essa aplicação, unindo baixo custo, dimensões reduzidas e características aceitáveis de radiação. Em (SHARAWI, RAWASHDEH, ALOI, 2010) uma antena do tipo monopolo foi projetada para a frequência de 2,4 GHz utilizando-se Epoxy FR-4 como substrato, obtendo-se dimensões reduzidas ao custo de um baixo ganho. No trabalho (RAHARDI et al, 2021), uma antena dipolo foi projetada também em FR-4 para a frequência de 433 MHz, utilizando-se da técnica de estrutura de meandro para reduzir o comprimento total da antena.

A antena *patch* é um modelo que une as características desejáveis de dimensões reduzidas,baixo custo e fácil fabricação, no entanto no seu formato padrão apresentam um padrão de irradiação direcional, portanto pouco explorado para essa aplicação.

2.9.1 ALGUMAS APLICAÇÕES DE RPAS

A) PULVERIZAÇÃO

O emprego da tecnologia dos RPAS na agricultura tem mostrado o aumento significativo da produtividade do trabalho no campo, já que consegue mais precisão além de reduzir obstáculos como distância, clima, etc.

A pulverização é a disseminação de nutrientes, fertilizantes e principalmente agroquímicos em pequenas partículas em um determinado local planejado. E, quando realizada de forma aérea, tem mostrado resultados positivos em relação a forma terrestre, no que diz respeito ao tempo de ação (BARBIZAN;CAVICHOLI,2023).

RPAS utilizados como pulverizadores mostraram-se altamente eficazes no combate de possíveis fungos e doenças pois atuam diretamente na lavoura danificada, reduzindo os riscos da proliferação destes males em toda a cultura (BARBIZAN;CAVICHOLI,2023).

B) MONITORAMENTO

Seja na agricultura, cobertura de eventos ou vigilância de fronteiras, os RPAS também dominam a aplicação de monitoramento. Seja por seu porte, por ser silencioso e ágil, é capaz de captar imagens de alta resolução e transmitidas em tempo real, permitindo assim, a tomada de decisões de maneira mais rápida ou mesmo criação de evidências, seja na atuação de um defensivo agrícola ou mesmo na captação de imagens de pessoas contrabandeando ou invadindo a fronteira de maneira ilegal.

Tal aplicação de monitoramento, mostra a versatilidade, a capacidade e a importância destes dispositivos – inclusive tendo acesso às áreas de acesso mais restrito, mostrando o diferencial desta tecnologia nestes setores.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste Capítulo, serão apresentados os resultados referentes ao emprego das técnicas de casamento de impedância em banda larga e de miniaturização a uma antena *patch* retangular com alimentação de linhas de *microstrip*.

O substrato escolhido foi o RT/duroid® 5880 da Rogers Coporation com espessura de 0,508mm, utilizando-se trilhas de cobre com 17,5µm de espessura, a fim de garantir um equilíbrio entre desempenho elétrico e dimensões físicas reduzidas.

3.1 DESIGN INICIAL DA ANTENA *PATCH* RETANGULAR COM ALIMENTAÇÃO

O primeiro passo consistiu em desenvolver uma antena *patch* retangular com alimentação por linha de *microstrip*, projetada para a impedância de 50Ω na frequência de 2,5GHz. As dimensões de largura da linha de *microstrip* são obtidas pela equação 2.8 do comprimento e largura da antena são calculadas a partir de 2.1 e 2.2.

Para o casamento de impedância entre antena e linha de *microstrip*, foi utilizada a técnica de inserção de duas reentrâncias na antena para ajustar a resistência de entrada da antena com a impedância de 50Ω da linha de *microstrip*, conforme a Figura 4. Através da equação 2.5 é possível determinar um valor para a dimensão y_0 através dos seguintes passos.

É conhecido que a resistência de entrada da linha de *microstrip* é de 50Ω, ou seja, $R_{in}(y_0) = 50$, e que a resistência de entrada na borda da antena é $R_{in}(y_0 = 0) = 144$. Portanto, obtêm-se a resistência de entrada normalizada:

$$\frac{R(y_0)}{R(y_0 = 0)} = 0,347. \quad (3.1)$$

Aplicando-se a equação 2.5.

$$\frac{R(y_0)}{R(y_0 = 0)} = \cos^2\left(\frac{\pi y_0}{L}\right) = 0,347. \quad (3.2)$$

Encontra-se o valor de y_0 normalizado:

$$\bar{y}_0 = \frac{1}{\pi} \arccos(\sqrt{0,347}). \quad (3.3)$$

$$\bar{y}_0 = 0,3. \quad (3.4)$$

Então o valor de y_0 é calculado por:

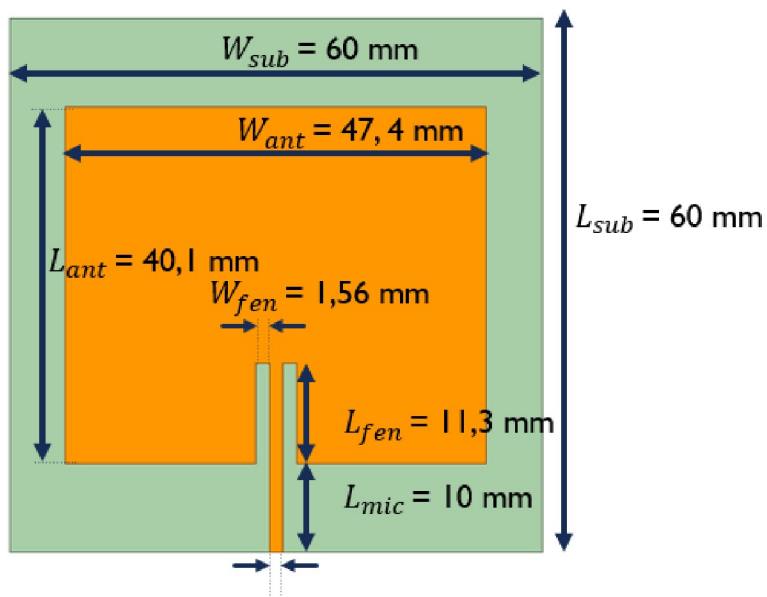
$$y_0 = \bar{y}_0 L = 12 \text{ mm.} \quad (3.5)$$

No contexto da apresentação dos resultados, a dimensão y_0 é denominada como L_{fen} . O valor inicial da largura da fenda considerado foi de mesmo valor da largura da linha de microstrip.

Com os valores iniciais das dimensões, foi possível construir o design inicial da antena patch retangular com alimentação por linha de *microstrip*. A Figura 8 representa o desenho da vista superior da antena referenciando as dimensões especificadas na Tabela 2.

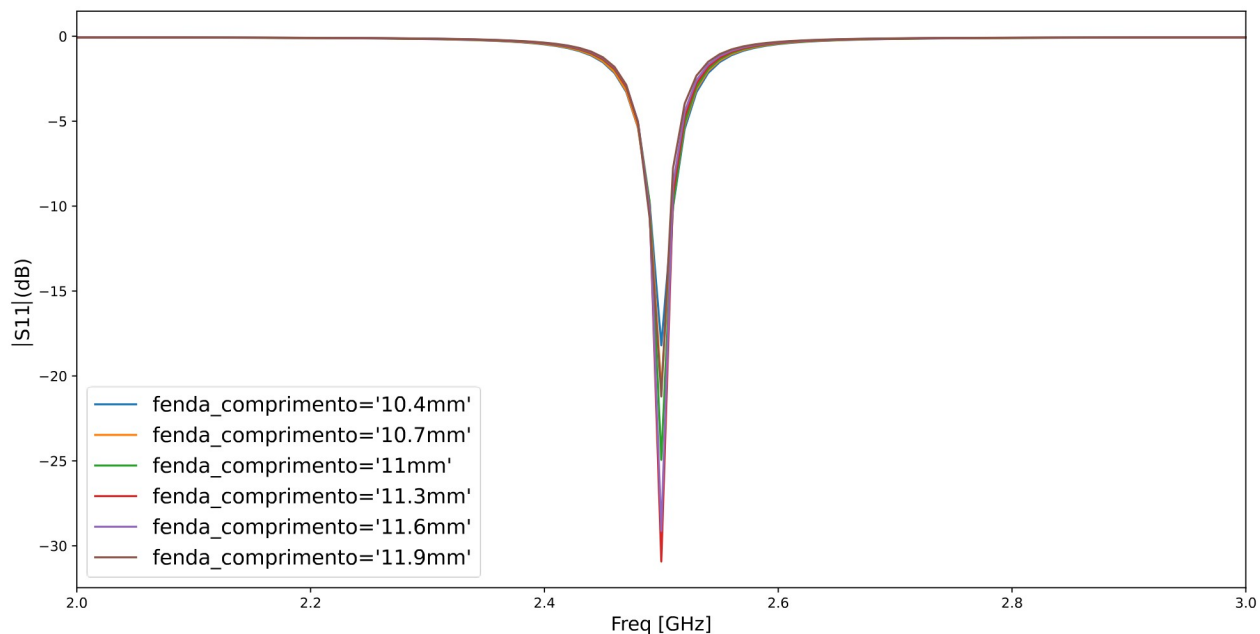
A fim de otimizar o casamento de impedância entre a linha de *microstrip* e a antena, foi feita a análise paramétrica do comprimento das reentrâncias. A Figura 9 mostra a análise paramétrica feita para a dimensão L_{fen} , com dimensões variando de 10,4mm a 11,9mm, com passo de 0,1mm. Conforme os resultados apresentados, o melhor valor para a variável analisada é de 11,3mm.

Figura 8. Desenho da vista superior da antena *patch* retangular no seu *design* inicial completo.



Fonte: Elaborado pela própria autora.

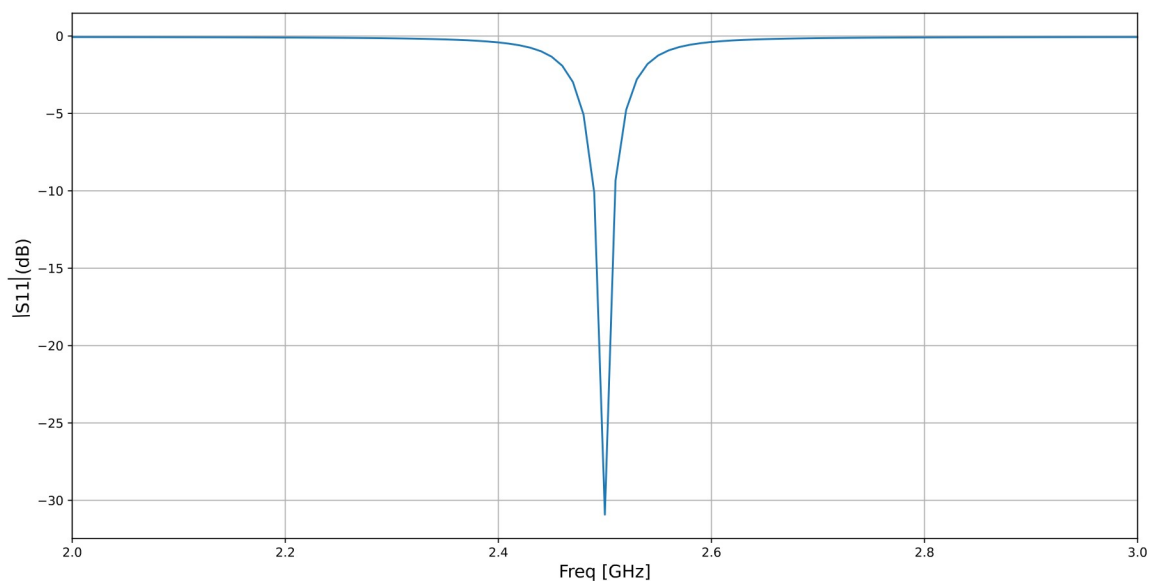
Figura 9. Análise paramétrica comprimento da fenda na antena de banda estreita.



Fonte: Elaborado pela própria autora.

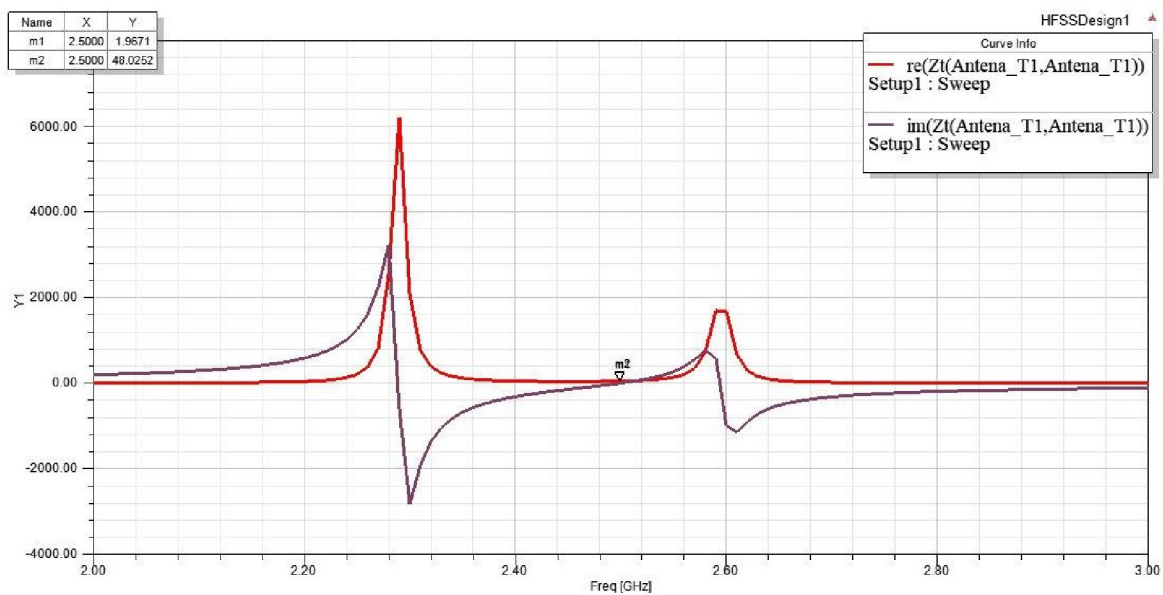
A Figura 10 mostra individualmente o módulo do parâmetro $|S_{11}|$ da antena após o ajuste na variável L_{fen} de 12 para 11,3mm, enquanto a Figura 11 mostra o componente real e imaginário da impedância de entrada do conjunto linha de *microstrip* e antena *patch*. É observado que na frequência de 2,5 GHz a reatância é próxima de zero, enquanto o componente real da impedância é próximo a 50Ω .

Figura 10. Módulo de $|S_{11}|$ da antena patch após o casamento de impedância. Percentual de banda de 4%.



Fonte: Elaborado pela própria autora.

Figura 11. Componente real e imaginário da impedância de entrada da antena.



Fonte: Elaborado pela própria autora.

Após os ajustes, a Tabela 2 resume todas as medidas identificadas na Figura 8.

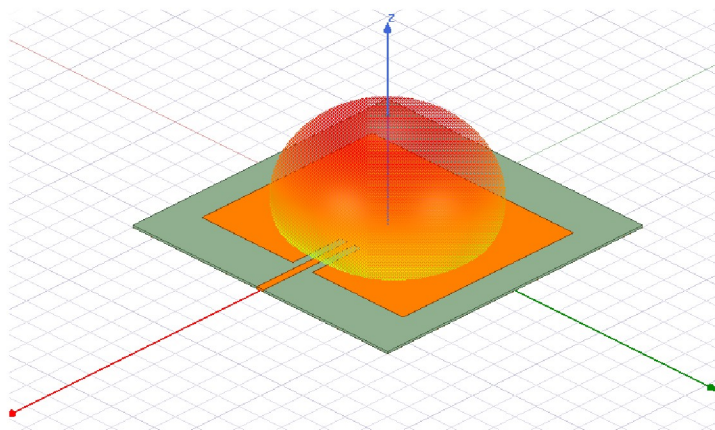
Tabela 2. Dimensões da antena *patch* no *design* inicial.

Variável	Dimensão	Medida (mm)
L_{ant}	Comprimento da antena	40,1
W_{ant}	Largura da antena	47,4
L_{fen}	Comprimento da fenda	11,3
W_{fen}	Largura da fenda	1,56
L_{mic}	Comprimento da linha de <i>microstrip</i>	10
W_{mic}	Largura da linha de <i>microstrip</i>	1,56
L_{sub}	Comprimento do substrato	60
W_{sub}	Largura do substrato	60

Fonte: Elaborado pela própria autora.

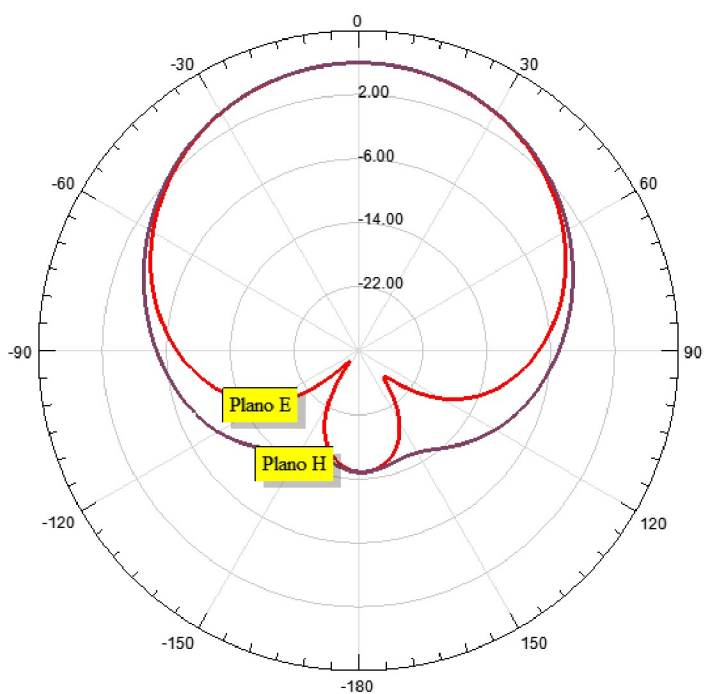
A Figura 12 mostra a visão isométrica da antena com a sobreposição do diagrama de ganho de radiação, enquanto a Figura 13 mostra o diagrama de radiação de ganho em 2D dos planos E e H.

Figura 12. Visão isométrica da antena sobreposta pelo diagrama de radiação 3D.



Fonte: Elaborado pela própria autora.

Figura 13. Diagrama de radiação de ganho em 2D da antena *patch* retangular no *design* inicial na frequência de 2.5 GHz. Planos E e H.

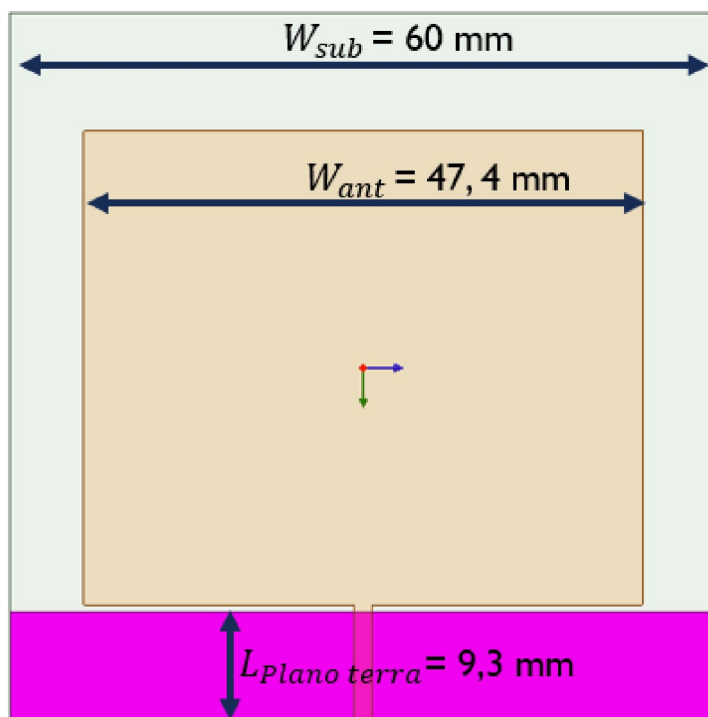


Fonte: Elaborado pela própria autora.

3.2 REDUÇÃO DO COMPRIMENTO DO PLANO TERRA

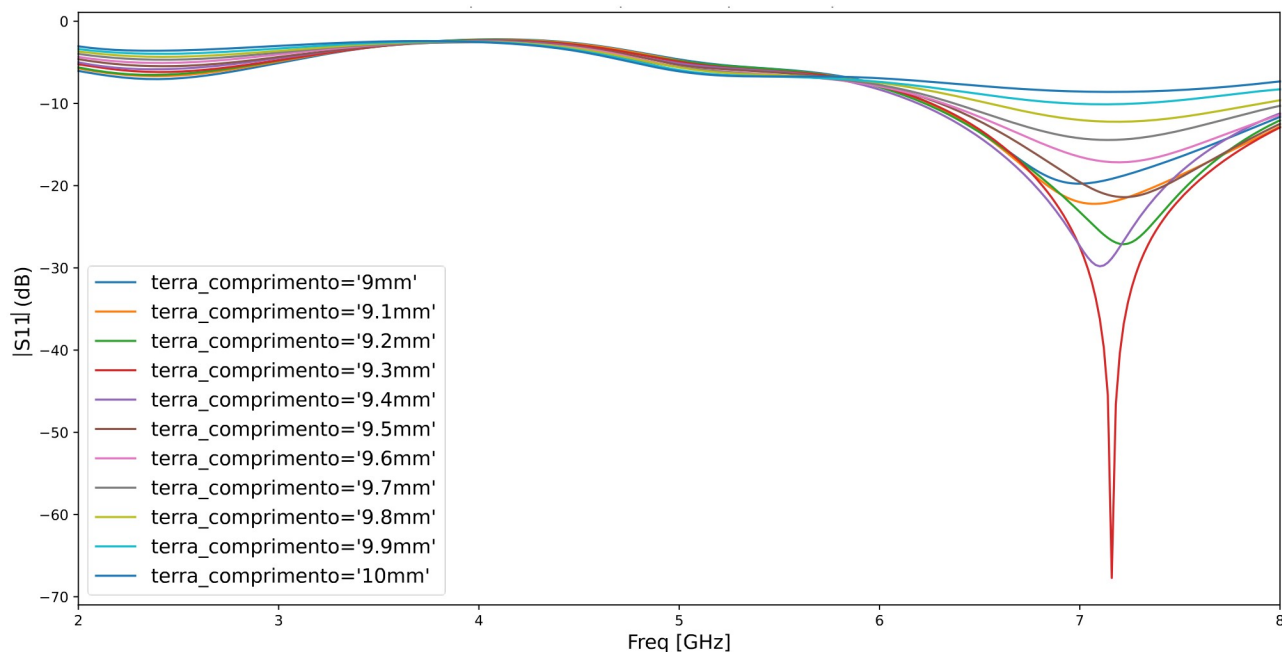
O próximo passo do trabalho foi a redução do comprimento do plano terra e a remoção das reentrâncias feitas para casamento de impedância em banda estreita, de forma que após as modificações a impedância de entrada da antena permitisse um casamento de impedância em banda larga, além de modelar o diagrama de ganho de radiação da antena de direcional para omnidirecional, um dos pontos importantes para a aplicação visada no desenvolvimento desse trabalho. A Figura 14 mostra a visão superior da antena com vista para o plano inferior mostrando o comprimento do plano terra, enquanto a Figura 15 mostra a análise paramétrica para encontrar o melhor comprimento do plano terra. O comprimento escolhido foi de 9.3mm, cuja curva do módulo de $|S_{11}|$ é mostrada na Figura 16.

Figura 14. Antena *patch* retangular com plano terra reduzido.



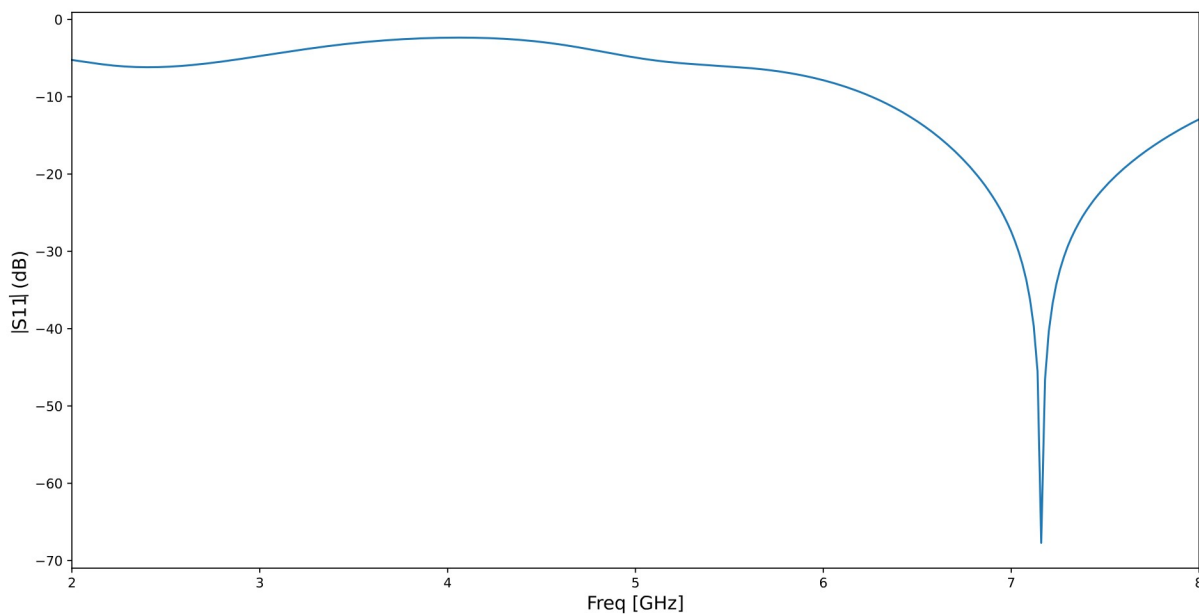
Fonte: Elaborado pela própria autora.

Figura 15. Análise paramétrica comprimento do plano terra.



Fonte: Elaborado pela própria autora.

Figura 16. Módulo de $|S_{11}|$ (dB) da antena com plano terra de 9.3mm de comprimento. Percentual de banda de 25%.



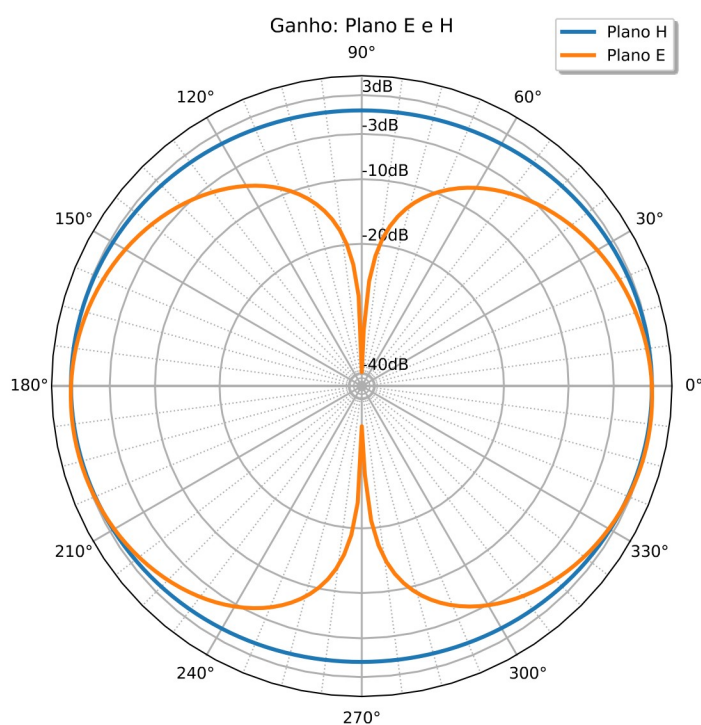
Fonte: Elaborado pela própria autora.

Os resultados mostram um comportamento diferente da curva do módulo de $|S_{11}|$ com relação ao modelo inicial de banda estreita, aumentando a largura de banda de aproximadamente 20 MHz para cerca de 1700MHz, considerando o módulo de $|S_{11}|$ abaixo de

-10 dB. No entanto, o casamento de impedância ainda não é eficiente para as bandas do Wi-Fi de menor frequência.

É importante ressaltar que, além da mudança na característica da impedância de entrada da antena, o uso de plano terra parcial também altera o formato do diagrama de radiação de ganho, passando de um diagrama direcional, conforme a Figura 13, para um omnidirecional, de acordo com a Figura 17. Para a aplicação proposta neste trabalho, essa mudança é importante pois antenas instaladas em drones necessitam de um padrão de irradiação omnidirecional, devido aos possíveis ângulos de recepção formado com a antena em solo.

Figura 17. Diagrama de radiação de ganho da antena com plano terra parcial em 2,5 GHz. Planos E e H. Máximo ganho de 3.1 dB na direção de 188° no Plano E.



Fonte: Elaborado pela própria autora.

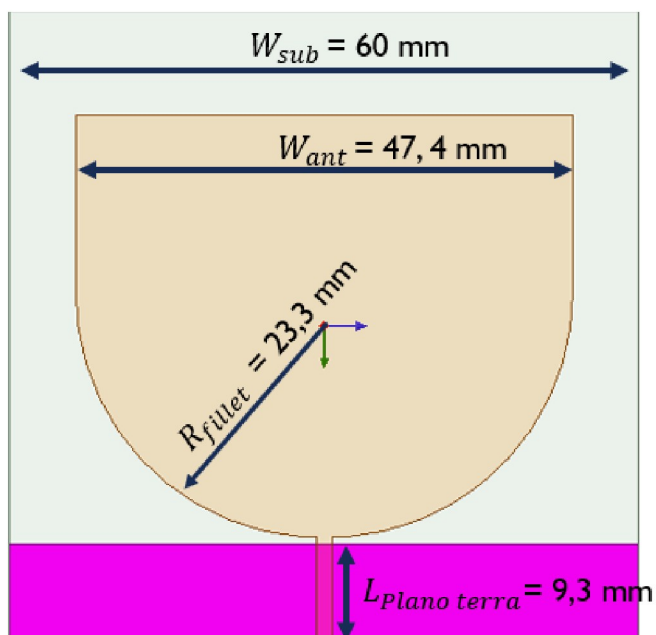
3.3 ARREDONDAMENTO DAS BORDAS INFERIORES DA ANTENA

O próximo passo foi o arredondamento das bordas inferiores da antena a fim de melhorar o casamento de impedância em todas as bandas de interesse. A Figura 18 mostra a vista superior da antena com o arredondamento nas bordas inferiores na sua configuração final.

Para determinar o raio do “fillet” inserido em cada borda, foram feitas análises paramétricas variando essa dimensão, representadas nas Figura 19 e Figura 20. Inicialmente, foi feita uma análise variando o raio de 15 mm a 23 mm, com passo de 1 mm, e foi observado

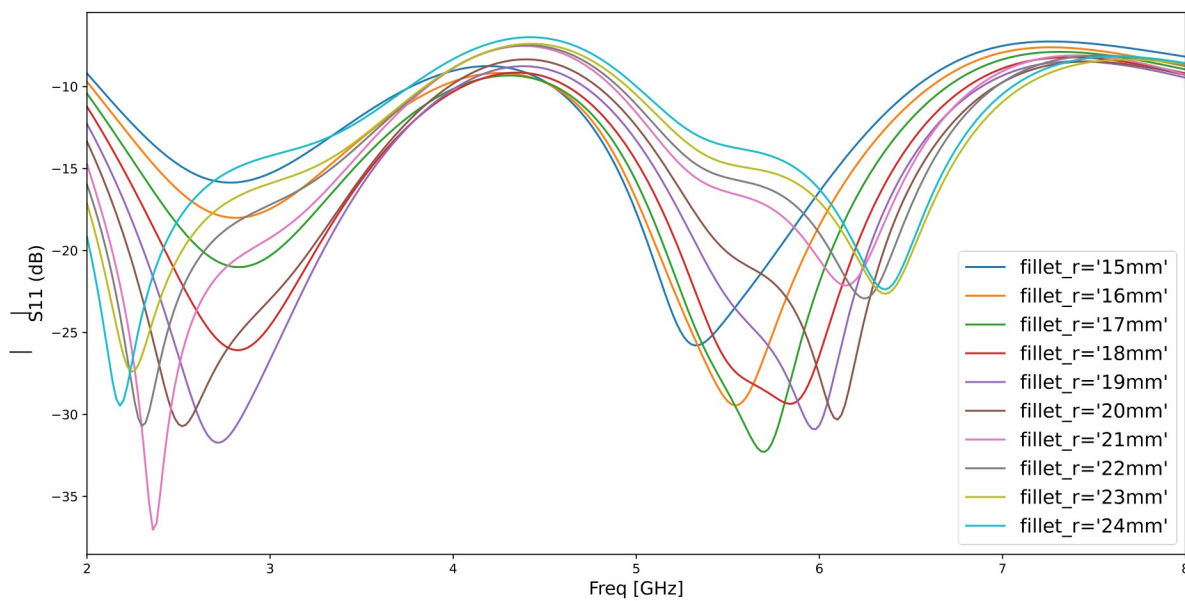
que os valores que mais otimizariam o casamento de impedância para todas as frequências de interesse estavam entre 23mm e 24mm, conforme visto na Figura 20. Posteriormente, foi feita uma análise mais refinada próximas as dimensões selecionadas anteriormente, com passo de 0,3mm, que constatou a medida de 23,3mm como a dimensão mais otimizada, conforme visto na Figura 20. A Figura 21 mostra a curva do módulo de $|S_{11}|$ para o valor escolhido de 23.3mm. Observa-se que para todas as frequências de interesse, a curva de $|S_{11}|$ está abaixo do valor de 10 dB.

Figura 18. Antena *patch* retangular com bordas inferiores arredondadas – Vista sobreposta.



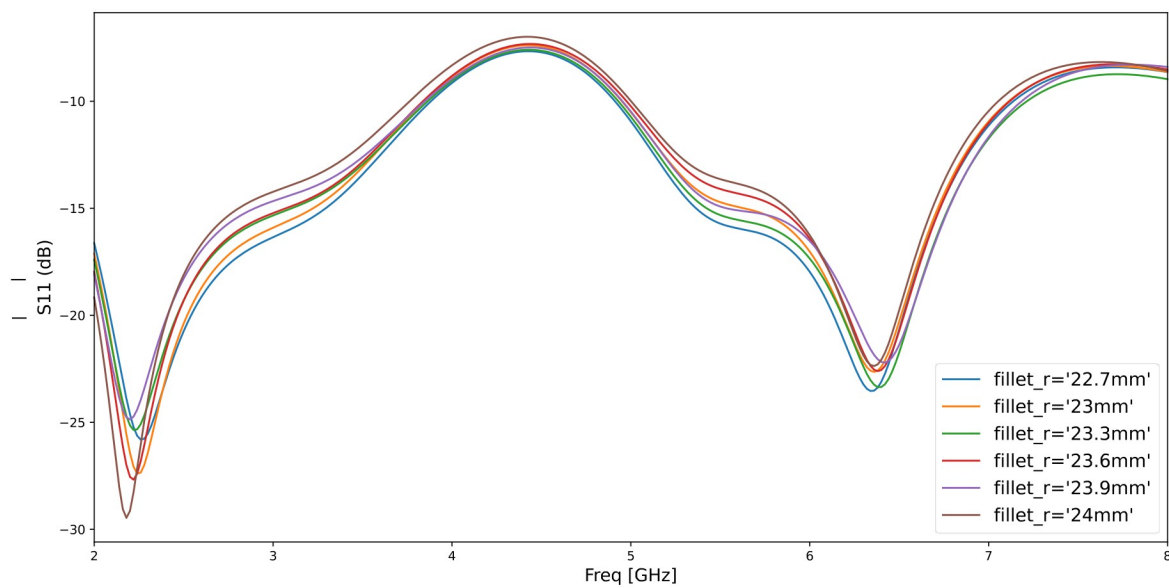
Fonte: Elaborado pela própria autora.

Figura 19. Análise paramétrica com o raio do arredondamento das bordas da antenna.



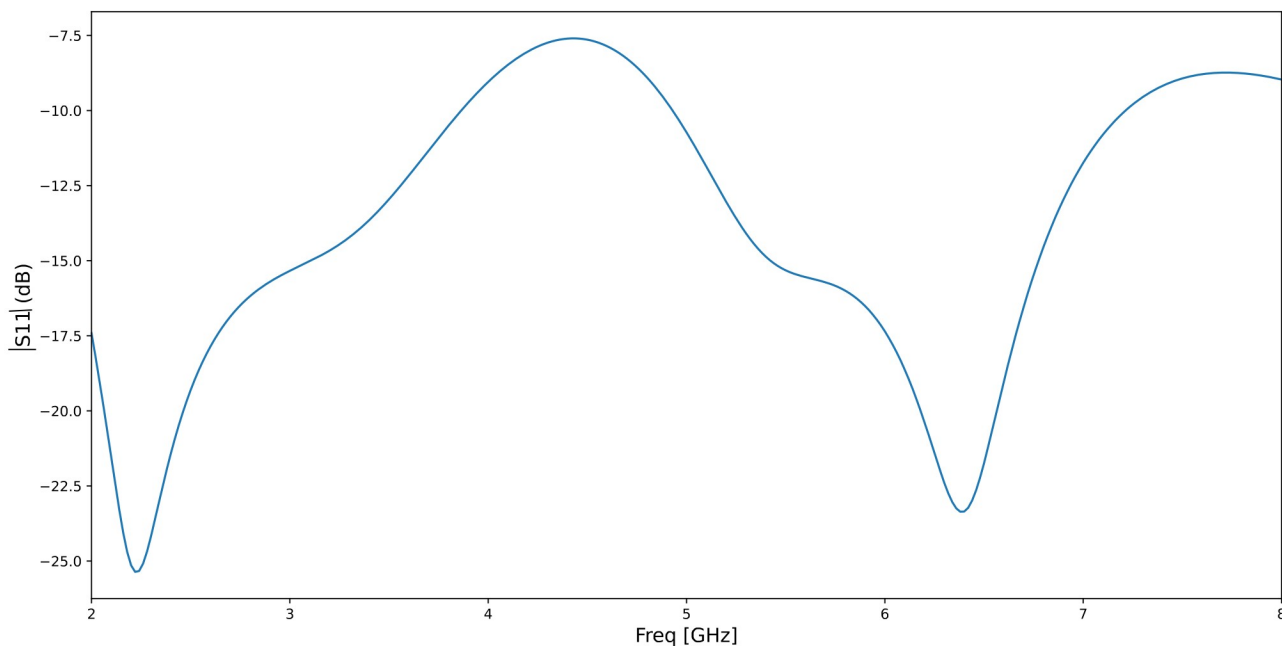
Fonte: Elaborado pela própria autora.

Figura 20. Análise paramétrica com o raio do arredondamento das bordas da antenna, refinando o passo para 0,3 mm.



Fonte: Elaborado pela própria autora.

Figura 21. Módulo de $|S_{11}|$ (dB) da antena com raio de 23.3mm. Percentual de banda total de 100%.



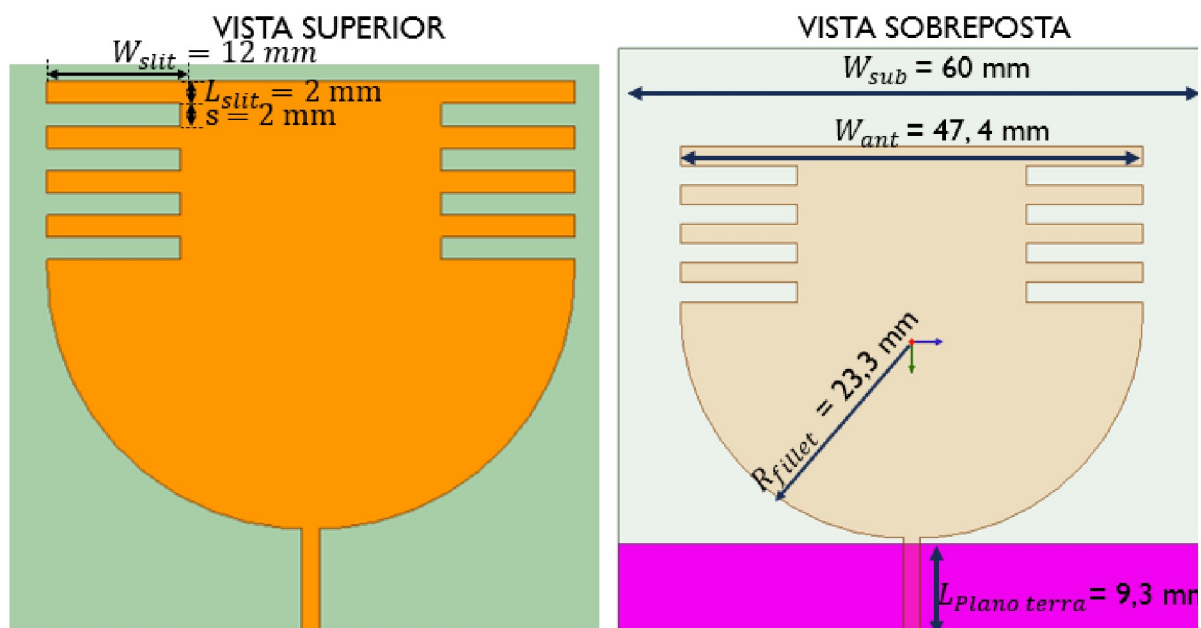
Fonte: Elaborado pela própria autora.

3.4 INSERÇÃO DE FENDAS NA ANTENA

O último passo do trabalho foi o de inserção de fendas na antena para aumentar seu comprimento elétrico, de forma que seja possível reduzir as dimensões da antena sem prejuízos significativos ao desempenho. A Figura 22 mostra a vista superior da antena com a inserção das fendas.

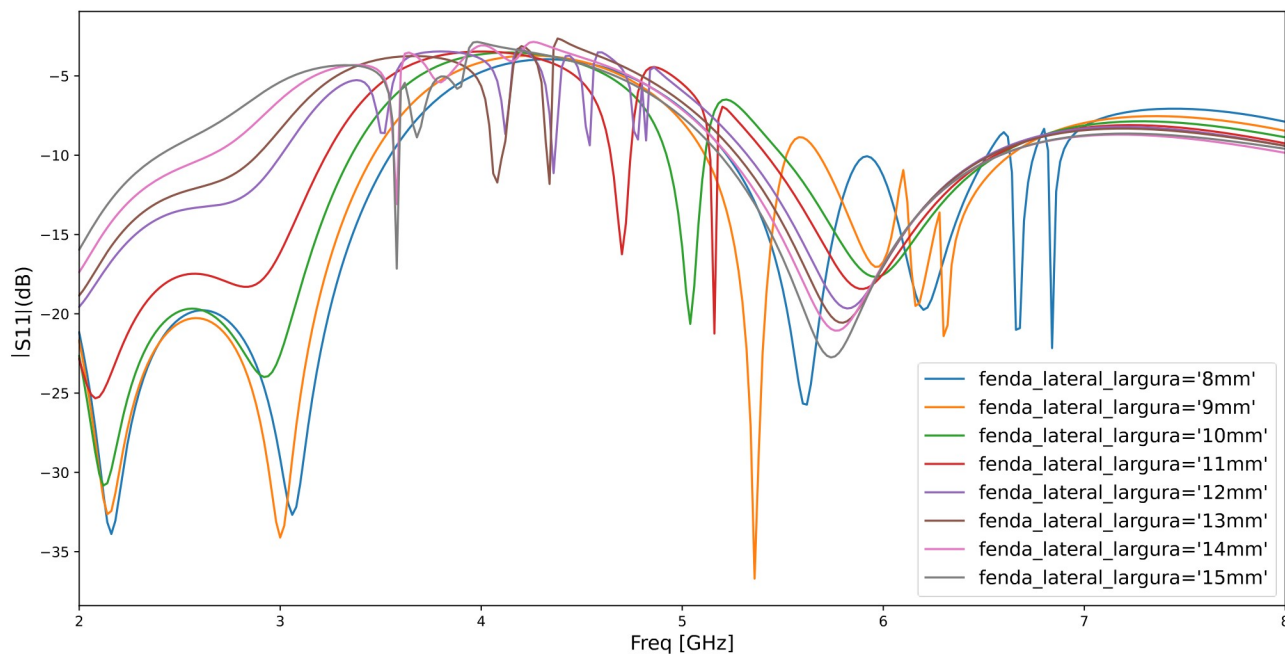
Análises paramétricas foram feitas para determinar a dimensão da profundidade e do comprimento das fendas (dimensões referenciadas respectivamente como W_{slit} e L_{slit} na Figura 22) e, como essas fendas deslocam a curva de $|S_{11}|$, são necessárias novas análises paramétricas para determinar as novas dimensões de largura e comprimento da antena. A Figura 23 mostra a análise paramétrica feita para determinar a profundidade das fendas, enquanto a Figura 24 mostra a análise paramétrica feita para determinar o comprimento da fenda.

Figura 22. Vista superior da antena com a inserção das fendas laterais.



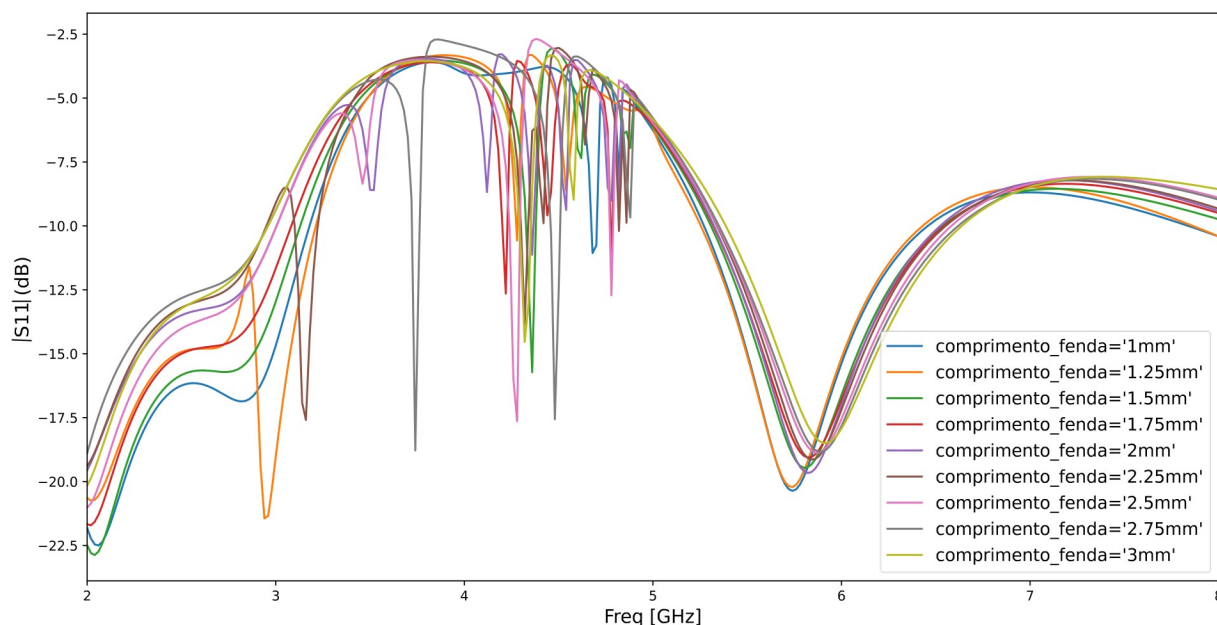
Fonte: Elaborado pela própria autora.

Figura 23. Análise paramétrica da profundidade da fenda.



Fonte: Elaborado pela própria autora.

Figura 24. Análise paramétrica do comprimento da fenda (parâmetro L_{slit} da Figura 22).



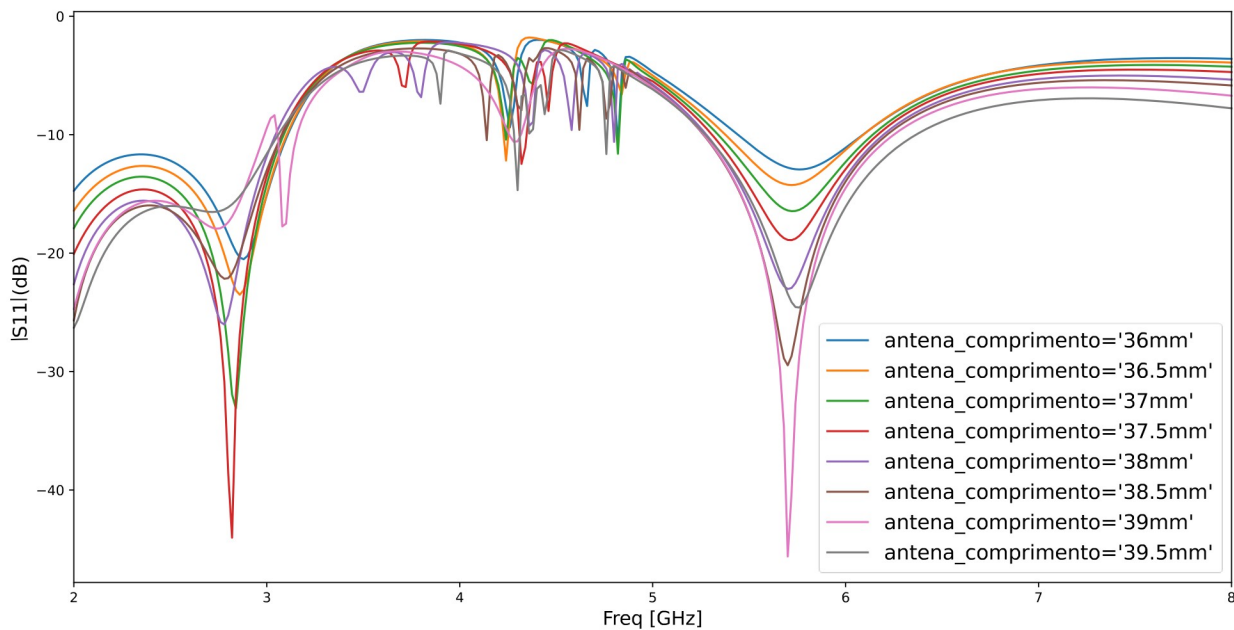
Fonte: Elaborado pela própria autora.

A profundidade escolhida para a antena foi de 12mm, enquanto o comprimento escolhido foi de 2mm, pois estas dimensões apresentam maior abrangência da região abaixo de -10 dB nas bandas de interesse. Dessa forma, as dimensões usadas de acordo com a nomenclatura da Figura 22 são: $s=2\text{mm}$; $W_{slit}=12\text{mm}$; $L_{slit}=2\text{mm}$.

Posteriormente, foram realizadas análises paramétricas para determinar as novas dimensões de comprimento e largura da antena, mostradas respectivamente na Figura 25 e 26.

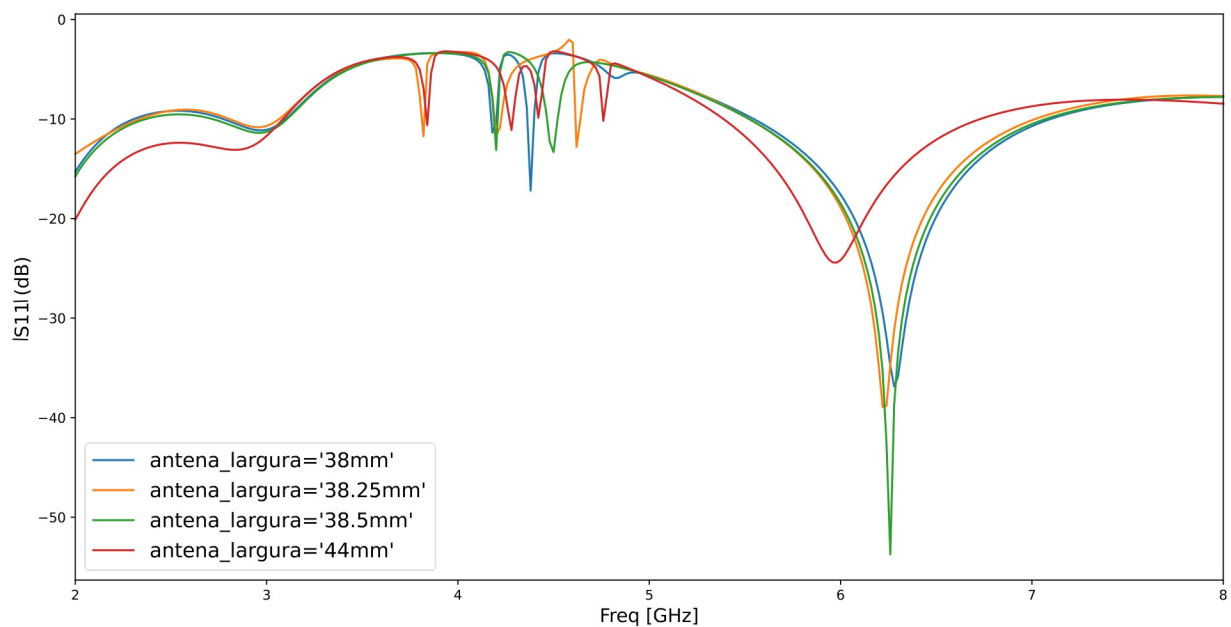
Os resultados para essa análise paramétrica indicaram que manter a dimensão de comprimento em 40mm e reduzir a largura para 38,5mm é a configuração que melhor preserva a largura de banda de operação da antena. A eventual redução no comprimento da antena mostra comprometer o casamento de impedância na maior parte da banda de 6 GHz, conforme a Figura 25. Portanto, optou-se por não reduzir essa dimensão.

Figura 25. Análise paramétrica do comprimento da antena mantendo a largura fixa em 47,4mm.



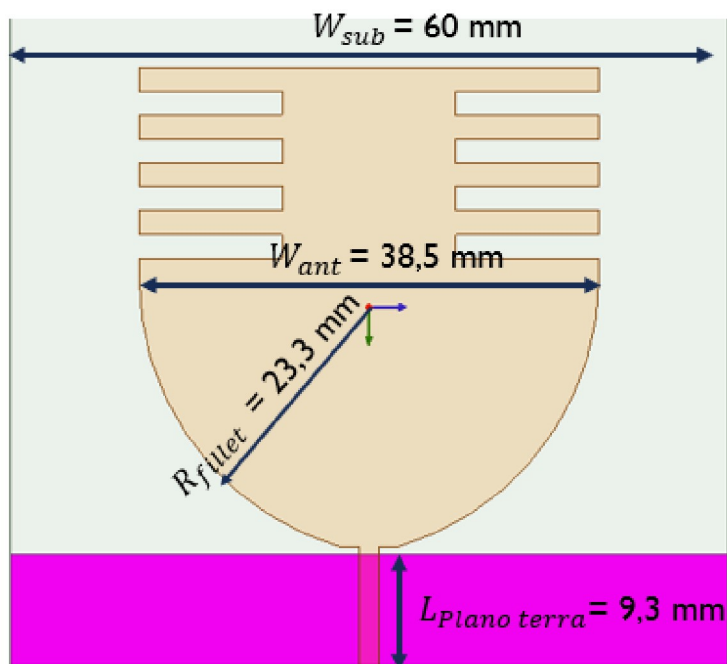
Fonte: Elaborado pela própria autora.

Figura 26. Análise paramétrica das dimensões de comprimento e largura da antena. Comprimento da antena fixo em 40mm.



Fonte: Elaborado pela própria autora.

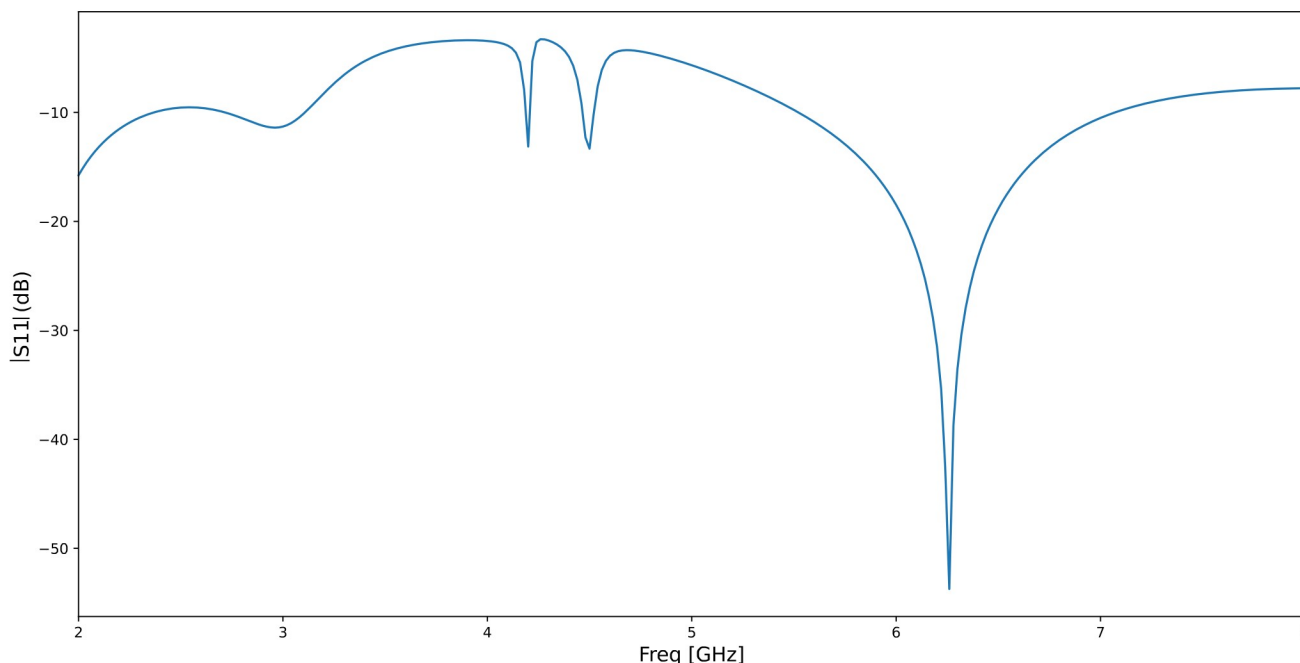
Figura 27. Antena com as dimensões reduzidas.



Fonte: Elaborado pela própria autora.

A Figura 27 mostra a antena com as dimensões reduzidas enquanto a Figura 28 mostra a curva do módulo de $|S_{11}|$ para as dimensões determinadas nas análises paramétricas anteriores. É visto que para algumas partes das bandas de interesse a curva fica um pouco acima de -10 dB , como na banda de $2,4 \text{ GHz}$. No entanto, a margem de variação está dentro de $0,5 \text{ dB}$ e o casamento de impedância é preservado na maior parte das frequências de operação utilizadas pelas tecnologias alvo deste trabalho.

Figura 28. Módulo de S11 da antenna com largura reduzida de 47,4mm para 38,5mm.
Percentual de banda de 46%.

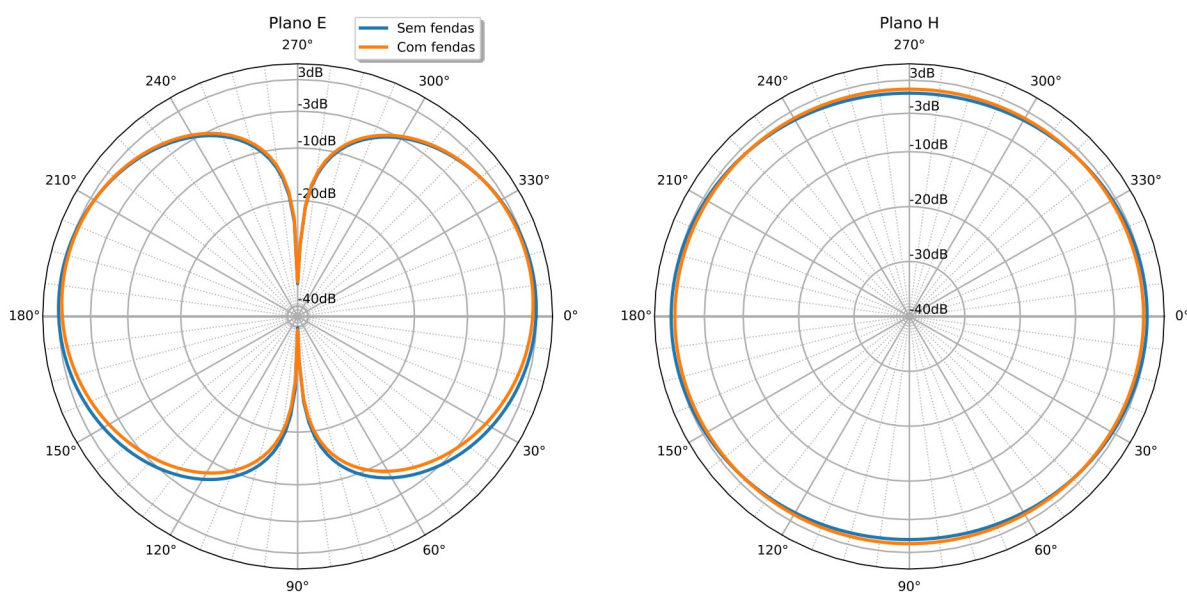


Fonte: Elaborado pela própria autora.

As Figuras 29, 30 e 31 mostram os diagramas de radiação de ganho nas frequências de 2,5GHz, 5,8GHz e 6,5 GHz, respectivamente, para a antena miniaturizada com fendas e a antena com dimensões originais sem fendas.

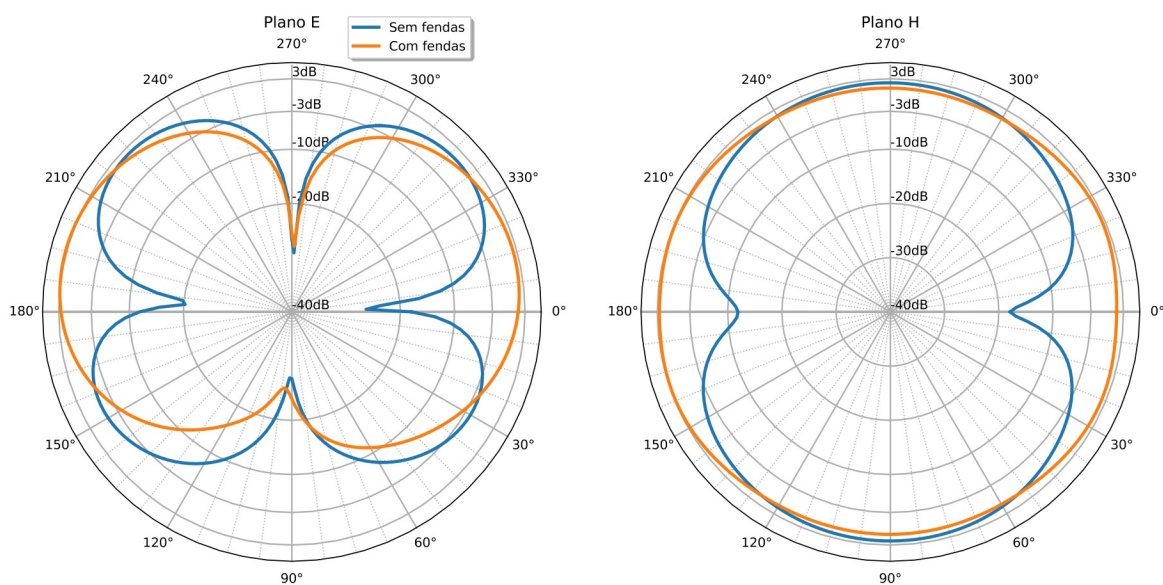
É observado que na frequência de 2,5 GHz há poucas diferenças entre os dois modelos de antena, enquanto o ganho máximo da antena miniaturizada é de 2.7dB na direção de 178° no Plano E, o máximo ganho da antena de dimensões iniciais é de 3.1 dB a 188° no Plano E. Na frequência de 5,8 GHz, já são observadas maiores diferenças entre os diagramas de radiação das versões de antenas comparadas. A antena miniaturizada manteve o comportamento omnidirecional no Plano H, enquanto a outra versão de antena apresentou distorções nos dois planos. O máximo ganho da antena com fendas foi de 3.2 dB na direção de 194° no Plano E, enquanto a antena com dimensões iniciais ficou limitada a 2.3 dB na direção de 266° no Plano H. Por último, na frequência de 6,5 GHz é observado que o padrão de irradiação se mantém omnidirecional no Plano H na antena miniaturizada, atingindo o ganho máximo de 4 dB na direção de 206°. Já para sem fendas, o ganho máximo apresentado foi de 2.6 dB a 226°.

Figura 29. Diagrama de radiação de ganho da antena em 2,5 GHz. Planos E e H.



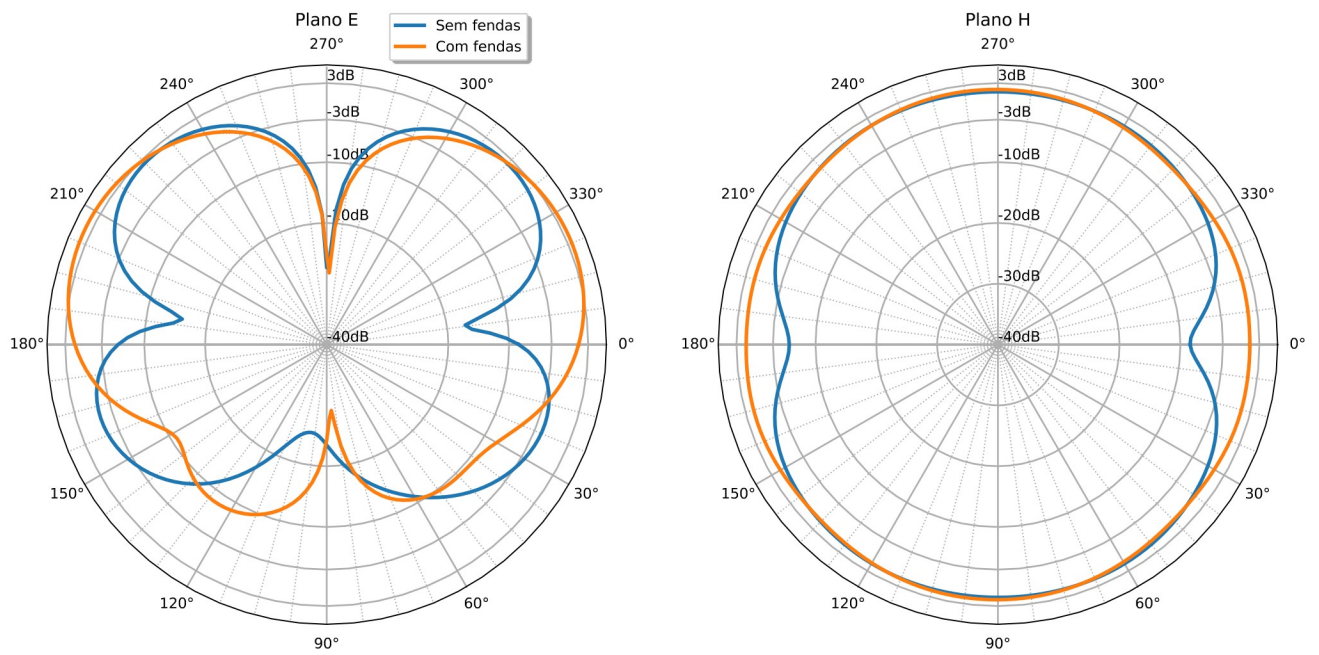
Fonte: Elaborado pela própria autora.

Figura 30. Diagrama de radiação de ganho da antena em 5,8 GHz. Planos E e H.



Fonte: Elaborado pela própria autora.

Figura 31. Diagrama de radiação de ganho da antena em 6,5 GHz. Planos E e H.



Fonte: Elaborado pela própria autora.

4 CONCLUSÃO

Neste trabalho, foi desenvolvida uma antena patch retangular omnidirecional de banda larga para a operação nas frequências empregadas nas tecnologias Wi-Fi em 2,4GHz, 5,8GHz e 6GHz, empregando a técnica de inserção de fendas para reduzir das dimensões da antena. Foi visto que a redução do comprimento do plano terra em combinação com o arredondamento das bordas inferiores da antena possibilitou o casamento de impedância em todas as bandas de interesse, utilizando-se como critério $|S_{11}|$ abaixo de -10 dB.

Posteriormente, a inserção de fendas laterais no corpo da antena possibilitou a redução da largura da antena em 8,9mm, aproximadamente 19%, ao custo de uma pequena perda de desempenho em termos de casamento de impedância na banda do Wi-Fi 2,4GHz e uma redução de 54% na banda percentual. No entanto, foi observado que a redução nas dimensões da antena não impactou de forma significativa o diagrama de irradiação da antena, mantendo o padrão omnidirecional em todas as faixas de frequência analisadas e o ganho igual ou superior a versão da antena com dimensões iniciais. Para estudos futuros, a inserção de mais fendas ou o aumento do comprimento delas podem ser consideradas a fim de uma redução mais significativa nas dimensões da antena.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

A. A. Rakholiya and N. V. Langhnoja. “*A review on miniaturization techniques for microstrip patch antenna*”. IJARIE-ISSN(O)-2395-4396. Vol-3 Issue-2 2017.

BARBIZAN, R. Z.; CAVICHIOLI, F. A. USO DE DRONES NA PULVERIZAÇÃO DA AGRICULTURA 4.0. *Revista Interface Tecnológica*, [S. l.], v. 19, n. 2, p. 584–596, 2022.

DOI: 10.31510/infa.v19i2.1454. Disponível em:

<https://revista.fatectq.edu.br/interfacetecnologica/article/view/1454>. Acesso em: 18 jun. 2023.

C. A. Balanis, *Antennas Theory; analysis and Design*, 3º Ed., Wiley Interscience, 2005.

C. F. L. Vasconcelos, M. R. M. L. Albuquerque, G. M. F. Freitas e A. G. D'Assunção, “*Study of a microstrip antenna on anisotropic metamaterials*,” *Applied Physics A*, vol. 111, pp. 1085-1089, Junho 2013, acesso em 01 de julho de 2023.

C. Sun, Z. Wu e B. Bai, “*A Novel Compact Wideband Patch Antenna*,” *IEEE transactions*

C. Yan, J. Zhang and J. Wang, “*A Comprehensive Survey on UAV Communication Channel Modeling*”, *IEEE Access*, vol. 7, 2019. Acesso em 16 de outubro 2021.

CAVALCANTE, L.E. Dissertação de Mestrado: ANÁLISE E SIMULAÇÃO DE ANTENAS DE MICROFITA ATRAVÉS DO MÉTODO FDTD, 2015. Disponível em

<https://core.ac.uk/download/pdf/299842889.pdf>, acesso em abril de 2022.

G. A. K. Benjwal, *Square Microstrip Antenna for Circular Polarization Operation*. *International Journal of Computer Applications*, Vol. 36, No. 4, Dezembro 2011.

G. Kumar e K. P. Ray, *Broadband Microstrip Antennas*, Artech House Publishers, 2003.

H. C. Nguyen et al., “*How to Ensure Reliable Connectivity for Aerial Vehicles Over Cellular Networks*,” *IEEE Access*, vol. 6, pp. 12 304 – 12 317, 2018.

HIPARC GEOTECNOLOGIA. Alerta de segurança operacional ASO-05-2015-Pag 1 .

Disponível em: <https://www2.anac.gov.br/anacpedia/por-ing/tr4132.htm>. Acessado em 03 de outubro de 2021.

I. J. Bahl e P. Bhartia, *Microstrip Antennas*, 2ª Ed., Artech House Publishers, 1982.

Igor F. Isidro, “*Sistemas de Transmissão e Recepção para Comunicações sem fio em Banda Ultra-Larga*”, Tese de Mestrado COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2005.

J. M. Ribero, G. Kossiavas, R. Staraj e E. Fond, *Dual-Frequency Antenna Circularly Polarized for GPS-SDARS Operation*, 2nd European Conference on Antennas and Propagation, EuCAP 2007, Edinburgh, UK, 2007.

KOOHESTANI. M, MOGHADASI, M. N., VIRDEE, B. S. *Miniature microstrip-fed ultrawideband printed monopole antenna with a partial ground plane structure. IET Microwaves, Antennas & Propagation*, Vol. 5, Iss. 14, pp. 1683-1689, 2011.

M. Ghavami, L.B.Michael, R.Kohno, “*Ultra Wideband Signals and Systems in Communication Engineering*”, John Wiley & Sons, Ltda, 2004.

M. John, J. Evans, M. Ammann, J. Modro, and Z. Chen, "Reduction of ground- plane-dependent effects on microstrip-fed printed rectangular monopoles," *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, vol. 2, n. 1, pp. 42-47, February 2008. Acesso em 30 de junho de 2023.

M. R. da Silva, *Novas Configurações de Monopolos Planares Quase-Fractais para Sistemas de Comunicações Moveis*, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Dezembro 2008.

M. S. Sharawi, O. A. Rawashdeh and D. N. Aloï, "Evaluation and Field Testing of an Embedded Antenna in a Small UAV Wing Structure", IEEE, 2010. Acesso em 19 de outubro de 2021.

Manish Varun Yadav and Sudeep Baudha. “*A Miniaturized Printed Antenna with Extended Circular Patch and Partial Ground Plane for UWB Applications*”. *Wireless Personal Communications*.

Millar, D. et al. *The Cambridge Dictionary of Scientists*. Cambridge University Press, 1996. Globo. Enciclopédia da Ciência. Editora Globo, 1996. Disponível em:<https://www.fem.unicamp.br/~em313/paginas/person/maxwell.htm>), acesso em maio de 2022.

Nasimuddin, X. Qing, Z. N. Che. *Compact Asymmetric-Slit Microstrip Antennas for Circular Polarization*. IEEE Transaction on Antennas and Propagation, Vol. 59, pp. 285-288, No. 1, Janeiro 2011.

on antennas and propagation, pp. 7334-7339, 12 2017 Dezembro, acesso em 01 de julho de 2023.

R. Rahardi at al. "Reduced Size Meander Line-based 433MHz Printed Dipole Antenna for UAV

Telemetry Application". IEEE, *International Conference on Radar, Antenna, Microwave, Electronics, and Telecommunications*, 2020. Acesso em 03 de novembro de 2021.

REMOTELY PILOTED AIRCRAFT SYSTEM (RPAS) CONCEPT OF OPERATIONS (CONOPS) FOR INTERNATIONAL IFR OPERATIONS. Disponível em:

<https://www.icao.int/safety/UA/Documents/ICAO%20RPAS%20Concept%20of%20Operations.pdf>. Acesso em 03 de outubro de 2021.

VULEJ, R. Marinha do Brasil, 2016. Disponível em :

<https://www.marinha.mil.br/spolm/sites/www.marinha.mil.br/spolm/files/O%20Uso%20de%20Drones%20%28VANT%29%20em%20Opera%C3%A7%C3%B5es%20Militares.pdf>, acesso em junho de 2022.

Y. Wang e Y. Lu, "*The striped rectangular patch antenna,*" *Microwave an Optical Technology Letters*, vol. 59, 16 Maio 2017, acesso em 01 de julho de 2023.