



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE

CENTRO DE TECNOLOGIA

PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM  
ENGENHARIA ELÉTRICA E DE COMPUTAÇÃO



# **Antenas de Microfita Multibanda e Reconfigurável para Aplicações em Sistemas de Comunicação Sem Fio, Padrões IEEE 802.11ah, IEEE 802.11ax e CBRS**

**KAIO MÁRCIO DA COSTA BANDEIRA**

Orientador: Prof. Dr. Valdemir Praxedes da Silva Neto

Coorientador: Prof. Dr. Vicente Angelo de Sousa Junior

**Dissertação de Mestrado** apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e da Computação da UFRN (área de concentração: Telecomunicações) como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica e de Computação.

Número de Ordem do PPgEEC: M548

Natal-RN, junho de 2019

Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN  
Sistema de Bibliotecas - SISBI  
Catalogação de Publicação na Fonte. UFRN - Biblioteca Central Zila Mamede

Bandeira, Kaio Márcio da Costa.

Antenas de microfita multibanda e reconfigurável para aplicações em sistemas de comunicação sem fio, padrões IEEE 802.11ah, IEEE 802.11ax e CBRS / Kaio Márcio da Costa Bandeira. - 2019.

65 f.: il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação, Natal, RN, 2019.

Orientador: Prof. Dr. Valdemir Praxedes da Silva Neto.

Coorientador: Prof. Dr. Vicente Angelo de Sousa Junior.

1. Antenas planares - Dissertação. 2. Antenas multibandas - Dissertação. 3. Antena monopolar - Dissertação. 4. Sistemas de comunicações sem fio - Dissertação. 5. Reconfiguração - Dissertação. I. Silva Neto, Valdemir Praxedes da. II. Sousa Junior, Vicente Angelo de. III. Título.

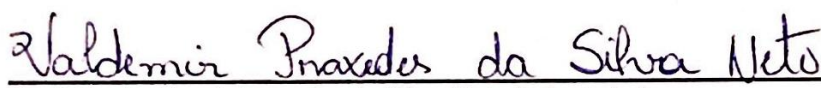
RN/UF/BCZM


CDU 621.396.67


**Antenas de Microfita Multibanda e  
Reconfigurável para Aplicações em Sistemas de  
Comunicação Sem Fio Padrões IEEE 802.11ah,  
IEEE 802.11ax e CBRS**

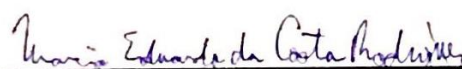
**KAIO MÁRCIO DA COSTA BANDEIRA**

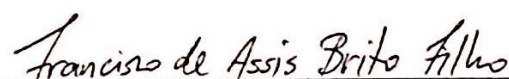
Dissertação de Mestrado aprovado em 27 de junho de 2019 pela banca examinadora  
composta pelos seguintes membros:

  
Prof. Dr. Valdemir Praxedes da Silva Neto (orientador).....DCO/UFRN

  
Prof. Dr. Vicente Angelo de Sousa Junior (coorientador).....DCO/UFRN

  
Prof. Dr. Cristianne de Fátima Linhares de Vasconcelos.....DCO/UFRN

  
Prof. Dr. Marcio Eduardo da Costa Rodrigues.....DCO/UFRN

  
Prof. Dr. Francisco de Assis Brito Filho.....UFERSA

*“E Maria disse: ‘Minha alma glorifica ao Senhor,  
Meu espírito exulta de alegria em Deus meu Salvador,  
Porque olhou para sua pobre serva.  
Por isso, desde agora,  
Me proclamam bem-aventurada todas as gerações,  
Porque realizou em mim maravilhas Aquele que é poderoso  
E cujo nome é Santo.’”*

Lucas 1, 46-49.

---

# Agradecimentos

---

A Deus.

Ao meu orientador, o professor Valdemir Praxedes da Silva Neto, sou grato pela orientação, incentivo, apoio e disponibilidade.

Ao meu coorientador, o professor Vicente Angelo de Sousa Junior, sou grato pela paciência, ajuda e incentivo.

À minha mãe, por sempre me apoiar e fazer o necessário para o meu desenvolvimento durante toda a vida.

À minha família que sempre me apoiou e me incentivou, especialmente ao meu tio Argemiro.

Aos amigos e colegas durante todo o curso, em especial, a Samuel Belarmino Paiva pelo companheirismo.

À Universidade Federal do Rio Grande do Norte, pela estrutura e incentivo à pesquisa e à Pós-Graduação.

À CAPES, pelo suporte financeiro.

---

# Resumo

---

Diante da evolução dos padrões de sistemas de comunicações sem fio, em que há a necessidade de atuação em diversas faixas de frequências, é indispensável a concepção de dispositivos capazes de atender aos requisitos que esse progresso demanda. As antenas são elementos que desempenham papel primordial nesses sistemas, no qual as antenas planares de microfita têm se demonstrado com elevada evidência devido ao seu baixo perfil, dispositivos miniaturizados, baixo custo de fabricação e são de fácil integração aos equipamentos. Com o objetivo de otimizar a ocupação de espaço físico nos transceptores e nos dispositivos finais dos usuários, este trabalho apresenta a proposta de uma antena de microfita baseada em um monopolo planar com plano de terra com fendas para operação em múltiplas bandas para atender novos sistemas de comunicações sem fio. São eles: IEEE 802.11ah, IEEE 802.11ax e o CBRS. Após isso, é implementada a reconfiguração em frequência mediante a utilização de diodos PIN. É apresentado o processo de formação do projeto e *design* da estrutura, considerando as pesquisas mais recentes na literatura especializada. Para fins de análise, são realizadas simulações pelo método dos Elementos Finitos implementado por meio do *software* comercial *ANSYS HFSS*. Alguns protótipos iniciais foram fabricados para fins de validação dos resultados preliminares deste trabalho. A caracterização experimental desses protótipos foi realizada mediante um analisador de redes vetorial. Diante das comparações entre resultados teóricos simulados e os experimentos preliminares, pode-se afirmar que uma boa concordância entre eles é observada, corroborando com os estudos até então desenvolvidos.

**PALAVRAS-CHAVE:** Antenas planares, antenas multibandas, antena monopolar, reconfiguração, comunicações sem fio.

---

# Abstract

---

In view of the evolution of the standards of wireless communication systems, where there is a need for performance in several frequency bands, it is indispensable to design devices capable of meeting the requirements that this progress demands. The antennas are elements that play a fundamental role in these systems, in which planar microstrip antennas have been in high evidence due to their low profile, miniaturized devices, low manufacturing cost and are easily integrated with the devices. With the objective of optimizing the occupation of physical space in the transceivers and in the end devices of the users, this work presents the proposal of a microstrip antenna based on a planar monopole with ground plane with slits for operation in multiple bands to meet new systems of wireless communications such as IEEE 802.11ah, IEEE 802.11ax and CBRS. After that, it will be implemented reconfiguration frequency by using PIN diodes. The process of design formation and design of the structure will be presented, considering the most recent research in the specialized literature. For the purposes of analysis, simulations were performed by the Finite Element method implemented through the commercial software Ansoft HFSS. Some initial prototypes were fabricated for purposes of validation of the preliminary results of this work. The experimental characterization of these prototypes was performed through a vector network analyzer. In view of the comparisons between simulated theoretical results and the preliminary experiments, it can be affirmed that a good agreement between them is observed corroborating with the studies previously developed.

**KEYWORDS:** Planar antennas, multiband antennas, monopolar antenna, reconfiguration, wireless communications.

---

# Sumário

---

Lista de Figuras.....	ii
Lista de Tabelas .....	iv
Lista de Símbolos e Abreviaturas .....	v
<b>Capítulo 1 - Introdução .....</b>	<b>1</b>
<b>Capítulo 2 - Padrões para Sistemas de Comunicações Sem Fio .....</b>	<b>4</b>
2.1 IEEE 802.11ah.....	4
2.2 IEEE 802.11ax.....	6
2.3 CBRS .....	7
<b>Capítulo 3 - Estado da Arte .....</b>	<b>9</b>
<b>Capítulo 4 - Projeto e Desenvolvimentos da Antenas de Microfita .....</b>	<b>20</b>
4.1 Antena para os Sistemas IEEE 802.11ah e IEEE 802.11ax.....	20
4.2 Antena Reconfigurável para os Sistemas IEEE 802.11ah, IEEE 802.11ax e CBRS .....	40
<b>Capítulo 5 - Conclusão.....</b>	<b>50</b>
Referências Bibliográficas .....	52

---

# Lista de Figuras

---

Figura 2.1 – Espectro especificado para o IEEE 802.11ah [13].....	5
Figura 2.2 – Divisão de canais para a padronização nos EUA [13].....	5
Figura 2.3 – Casos de uso para o CBRS: (a) <i>Neutral Host</i> e (b) Redes LTE privadas [11].....	8
Figura 3.1 – Geometria da estrutura proposta em [19].....	10
Figura 3.2 – Gráficos das perdas de retornos para as diferentes configurações da estrutura proposta em [19].....	11
Figura 3.3 – Geometria da antena proposta em [26].....	13
Figura 3.4 – Gráfico da perda de retorno para a estrutura do trabalho [26].....	14
Figura 3.5 – Geometria da estrutura proposta em [27].....	15
Figura 3.6 – Perda de retorno para a estrutura proposta em [27].....	15
Figura 3.7 – Geometria da antena proposta em [3].....	17
Figura 3.8 – Perda de retorno para as estruturas analisadas em [3].....	18
Figura 3.9 – Protótipo da antena reconfigurável construído em [32].....	19
Figura 4.1 – Geometria da estrutura para operação na banda de 2,4 GHz. a) Vista frontal, b) Vista posterior.....	21
Figura 4.2 – Perda de retorno simulada para o monopolo com plano de terra completo.....	22
Figura 4.3 – Gráfico da perda de retorno da estrutura com <i>slot</i> 30x30 mm <sup>2</sup> .....	23
Figura 4.4 – Geometria do <i>slot</i> no plano de terra. a) Vista frontal, b) Vista posterior.....	23
Figura 4.5 – Resultado da perda de retorno da análise paramétrica variando a dimensão (a) $L_0$ e fixando $W_0 = 30$ mm e variando a dimensão (b) $W_0$ e fixando $L_0 = 45$ mm.....	24
Figura 4.6 – Perda de retorno para a estrutura com <i>slot</i> retangular no plano de terra.....	25
Figura 4.7 – Geometria da <i>strip</i> inserida no <i>slot</i> do plano de terra. a) Vista frontal, b) Vista posterior.....	26
Figura 4.8 – Resultado da perda de retorno simulada para a estrutura com <i>strip</i> inserida no <i>slot</i> do plano de terra.....	27
Figura 4.9 – Perda de retorno da estrutura com o monopolo redimensionado.....	28
Figura 4.10 – Geometria do plano de terra modificado. a) Vista frontal, b) Vista posterior.....	29
Figura 4.11 – Gráfico da perda de retorno após a diminuição do <i>slot</i> .....	29

Figura 4.12 – Geometria da estrutura com a inserção de <i>strips</i> em formato “L” no plano de terra. a) Vista frontal, b) Vista posterior.....	30
Figura 4.13 – Gráfico da perda de retorno da estrutura apresentada na Figura 4.12.....	31
Figura 4.14 – Estrutura com a adição de <i>strips</i> em formato “L” no monopolo. a) Vista frontal, b) Vista posterior.....	32
Figura 4.15 – Gráfico da perda de retorno da estrutura apresentada na Figura 4.14.....	33
Figura 4.16 – Geometria da estrutura com suas dimensões finais para operação <i>tri-band</i> a) Vista frontal, b) Vista posterior.....	34
Figura 4.17 – Gráfico da perda de retorno da estrutura apresentada na Figura 4.16.....	34
Figura 4.18 – Protótipo construído. a) Vista frontal, b) Vista posterior.....	35
Figura 4.19 – Gráfico da perda de retorno simulado (tracejado) e medido (linear).....	36
Figura 4.20 – Diagrama de radiação para a banda de 900 MHz.....	38
Figura 4.21 – Diagrama de radiação para a banda de 2,4 GHz.....	39
Figura 4.22 – Diagrama de radiação para a banda de 5 GHz.....	39
Figura 4.23 – Modificação na dimensão da <i>strip</i> em "L". Novo tamanho: $L_3 = 9,5$ mm. a) Vista fronta, b) Vista posterior.....	41
Figura 4.24 – Gráfico simulado da perda de retorno da antena com modificação na dimensão $L_3$ ...41	41
Figura 4.25 – Diodo BAR64-05. (a) Diodo utilizado na estrutura e (b) sua representação gráfica....42	42
Figura 4.26 – Posição dos diodos na antena. a) Vista frontal, b) Vista posterior.....	43
Figura 4.27 – Perda de retorno simulada das configurações 2, 7 e 8.....	44
Figura 4.28 – Protótipo construído. a) Vista frontal, b) Vista posterior.....	45
Figura 4.29 – Resultado da medição para as configurações 2, 7 e 8.....	45
Figura 4.30 – Diagrama de radiação para a banda de 900 MHz.....	47
Figura 4.31 – Diagrama de radiação para a banda de 2,4 GHz.....	48
Figura 4.32 – Diagrama de radiação para a banda de 3,5 GHz.....	48

---

# Lista de Tabelas

---

Tabela 2.1 – Comparação entre os padrões IEEE 802.11.....	7
Tabela 3.1 – Dimensões dos elementos do <i>patch</i> .....	10
Tabela 4.1 – Resposta em frequência da antena construída para o padrão IEEE 802.11ah.....	37
Tabela 4.2 – Resposta em frequência da antena construída para o padrão IEEE 802.11ax (banda inferior).....	37
Tabela 4.3 – Resposta em frequência da antena construída para o padrão IEEE 802.11ax (banda superior).....	37
Tabela 4.4 – Resultados simulados das bandas de frequências alcançadas na reconfiguração...	43
Tabela 4.5 – Resposta em frequência da antena construída para o padrão IEEE 802.11ah.....	46
Tabela 4.6 – Resposta em frequência da antena construída para o padrão IEEE 802.11ax.....	46
Tabela 4.7 – Resposta em frequência da antena construída para o padrão CBRS.....	46

---

# Lista de Símbolos e Abreviaturas

---

IEEE	<i>The Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
IoT	<i>Internet of Things</i>
LTE	<i>Long-Term Evolution</i>
WLAN	<i>Wireless Local Area Network</i>
M2M	<i>Machine-to-Machine Communication</i>
AP	<i>Access Point</i>
V2V	<i>Vehicle-to-Vehicle Communication</i>
5G	Sistema de comunicação móvel de quinta geração
OFDMA	<i>Orthogonal Frequency Division Multiple Access</i>
MIMO	<i>Multiple Input Multiple Output</i>
QAM	<i>Quadrature Amplitude Modulation</i>
DSSS	<i>Direct Sequence Spread Spectrum</i>
WiMAX	<i>Worldwide Interoperability for Microwave Access</i>
FR-4	<i>Epoxy/Fiber-Glass</i>
CPW	<i>Coplanar Waveguide</i>
UWB	<i>Ultra-Wideband</i>
HFSS	<i>High Frequency Structure Simulator</i>
DGS	<i>Defected Ground Structure</i>
GSM	<i>Global System for Mobile Communications</i>
GPS	<i>Global Position System</i>
LCD	<i>Liquid Crystal Display</i>
$\lambda$	Comprimento de onda
$S_{11}$	Coefficiente de reflexão
$RL$	<i>Return Loss</i>
$f_r$	Frequência de ressonância
BW	Largura de banda
$\Delta$	Desvio

---

# Capítulo 1 - Introdução

---

Há alguns anos, os sistemas modernos de comunicações sem fio estão se tornando indispensáveis ao dia-a-dia dos usuários. Novos padrões de comunicações surgem para solucionar problemas de conectividade, capacidade das redes, taxa de transmissão, interferências eletromagnéticas, consumo energético, entre outras dificuldades enfrentadas pelos dispositivos sem fio [1]. Atualmente, há grande tendência para que um terminal móvel seja capaz de operar em diferentes tipos de padrões e tecnologias, trazendo diversas aplicabilidades para um mesmo aparelho, além de fornecer vantagens, tais como, tamanho miniaturizado, redução de custos, fácil integração aos sistemas, entre outros [2]. Para que isso ocorra, é importante o desenvolvimento de estruturas radiantes que atendam a essas características. Ou seja, o dispositivo deve ter a capacidade de operar em múltiplas bandas, e para isso, é necessário haver antenas que tenham essa disponibilidade para garantir a integração de várias tecnologias e serviços [3].

Um dos objetivos principais na utilização de estruturas multibandas é reduzir a quantidade de antenas utilizadas em um mesmo terminal para minimizar a ocupação do espaço físico necessário para sua operação. Ademais, isso evita a dificuldade de resolver problema de isolamento existente quando são usadas várias antenas próximas [4]. Sendo assim, as antenas planares se mostram adequadas para o emprego em dispositivos móveis em sistemas de comunicações sem fio devido a suas características de pequenas dimensões, facilidade de fabricação, baixo custo, baixo perfil, possibilidade de construção da estrutura de casamento de impedância juntamente com a antena em um mesmo substrato e a propriedade de poder operar em múltiplas bandas.

Estruturas planares estão em alta para atender a demanda das comunicações sem fio e, diante desse cenário, o objetivo deste trabalho é desenvolver uma única antena de microfita que seja reconfigurável em frequência e que seja capaz de operar em três bandas para três sistemas diferentes, são eles: IEEE 802.11ah (Wi-Fi *HaLow*), IEEE 802.11ax (Wi-Fi 6) e o CBRS (*Citizens Broadband Radio Service*). Inicialmente, é apresentado o projeto para uma antena multibanda para atender o Wi-Fi *HaLow* e o Wi-Fi 6, e em seguida é realizada algumas modificações no projeto inicial para a inclusão do sistema CBRS na segunda antena, assim como, é aplicada a reconfiguração em frequência. Atende-se, assim, uma grande demanda para

serviços de alta relevância no cenário atual de *IoT (Internet of Things)* [1], [5], [6] e também os sistemas de quinta geração (5G) em bandas não licenciadas [7], [8].

O padrão 802.11ah, também conhecido como Wi-Fi *HaLow*, atua em 900 MHz e disponibiliza maior alcance com menor custo de energia em relação ao Wi-Fi tradicional. O Wi-Fi *HaLow* oferece uma variedade de utilização para comunicações de baixo consumo de potência para casas inteligentes, veículos conectados, cidades inteligentes, entre outros serviços disponíveis para internet das coisas [9]. O IEEE 802.11ax trabalha nas faixas de frequência de 2,45 GHz e 5 GHz. Trata-se de uma evolução do Wi-Fi 5 que inclui maiores taxas de dados, maior capacidade do sistema, desempenho aprimorado em ambientes superdensos e melhoria na eficiência energética dos dispositivos [10]. O CBRS, opera na faixa de 3,55 GHz com uma largura de banda de 150 MHz e tem o objetivo de atuar no mercado das novas comunicações de quinta geração com tecnologias baseadas em LTE (*Long-Term Evolution*), definir novos casos de uso e idealizar novos modelos de negócios, além de estabelecer um programa de certificação de produtos nessa faixa, de maneira a garantir a interoperabilidade dos dispositivos de diferentes fornecedores [11], [12].

Diante desse cenário, observou-se a necessidade de estudar e desenvolver estruturas planares miniaturizadas com capacidade de operar em múltiplas bandas que tenham baixa complexidade em seu projeto e que sejam aplicáveis em terminais móveis para utilização nos serviços citados acima.

O objetivo geral deste trabalho é desenvolver uma estrutura radiante que atenda aos requisitos de frequência de ressonância e largura de banda, simultaneamente, para os padrões IEEE 802.11ah, IEEE 802.11ax e o CBRS. Após a obtenção desses resultados, aplicar-se-á a reconfiguração com a utilização de diodos PIN para escolha das bandas de frequências desejadas. Para que esse objetivo possa ser alcançado, alguns objetivos específicos foram estabelecidos, tais como, realizar um levantamento da literatura científica atual e especializada a respeito de antenas multibandas; caracterizar numericamente por meio de simulações algumas estruturas de antenas de multibandas; estabelecer um procedimento de *design* para a antena proposta, construir protótipos para fins de caracterização experimental e realização de medidas utilizando um analisador de redes vetorial.

O texto deste trabalho está dividido em cinco capítulos, conforme encontra-se mostrado a seguir:

O capítulo 2 discorre sucintamente sobre os padrões de comunicações sem fio utilizados neste trabalho.

O capítulo 3 apresenta trabalhos envolvendo estruturas planares que operam em múltiplas bandas de frequência e metodologias de desenvolvimento que serviram como base para o progresso deste trabalho, inclusive nas técnicas de reconfiguração em frequência.

O capítulo 4 apresenta o projeto e desenvolvimento das duas antenas de microfita para atender aos sistemas de comunicações sem fio IEEE 802.11ah, IEEE 802.11ax e CBRS.

O capítulo 5 apresenta as considerações finais, destacando os principais aspectos abordados, conclusões do estudo e projeto realizado e sugestões de continuidade do trabalho.

---

# Capítulo 2 - Padrões para Sistemas de Comunicações Sem Fio

---

Este capítulo tem como objetivo apresentar os padrões para sistemas de comunicações sem fio para os quais a antena foi projetada e desenvolvida, levando em consideração os requisitos das bandas de frequências de cada padrão, assim como, descrever algumas características e aplicações dos mesmos.

## 2.1 IEEE 802.11ah

O sistema IEEE 802.11ah, também conhecido como *Wi-Fi HaLow*, é um padrão de comunicações sem fio que define um sistema WLAN operando na faixa sub 1 GHz não-licenciada. Este é um padrão que apresenta características favoráveis de propagação no espectro de baixas frequências, tais como: menor atenuação no espaço livre, menos susceptível ao desvanecimento (causado pelo multipercurso) e maior capacidade de transpassar obstáculos, conseqüentemente, sua cobertura é bem maior quando comparada com os sistemas WLAN convencionais nas bandas de 2,4 e 5 GHz [13]. Esta tecnologia pode ser usada para diversos serviços, incluindo redes de sensores em larga escala, aumento da cobertura de *hotspots* e *Wi-Fi outdoor* para tráfego de dados móveis [13], [14].

O padrão *HaLow* surge como uma solução para problemas de propagação enfrentados pelos sistemas atuais em 2,4 e 5 GHz em ambientes internos e sua dificuldade de implementação para comunicações *Machine-to-Machine* (M2M). Devido ao alto congestionamento do espectro nessas faixas, o *Wi-Fi HaLow* busca absorver parte desse alto tráfego mediante as características de baixo custo de implementação, área de cobertura, adoção de mecanismos para gerenciamento de recursos de energia dos dispositivos e maior número de estações operando simultaneamente em uma mesma rede [14].

Além disso, a utilização de bandas em altas frequências impõe limites na distância de transmissão e, portanto, torna difícil a utilização desses padrões em ambientes externos, apesar das suas elevadas taxas de dados e baixo custo de implementação [13]. O *Wi-Fi HaLow* emerge como tentativa de superar essa dificuldade da propagação, sendo bastante favorável para

implementação de redes de sensores em larga escala (*smart grid*) e com um número de dispositivos conectados à rede bem maior que os sistemas WLAN atuais [5], [13], [14].

Um dos principais casos de uso para o IEEE 802.11ah é a aplicação de sensores e medidores, como por exemplo, em *smart grid*, em que um *Access Point* (AP) conectado às companhias/concessionárias, posicionado em ambiente externo, se conecta a medidores de energia, água e/ou gás implantados nas residências com o objetivo de monitorar o *status* em tempo real do uso desses recursos [13].

O IEEE 802.11ah opera na faixa sub 1 GHz, porém, em diferentes frequências dependendo do país. A Figura 2.1 ilustra as bandas utilizadas em alguns países ao redor do mundo. Para este trabalho, foi levada em consideração a banda utilizada nos Estados Unidos, que engloba a faixa de 902 a 928 MHz, devido a relevância que este país tem no desenvolvimento de tecnologias. De acordo com a Figura 2.2, percebe-se que esse padrão fornece canais de 1, 2, 4, 8 e 16 MHz. Os canais de maiores larguras de banda são formados pela junção de canais adjacentes [13].

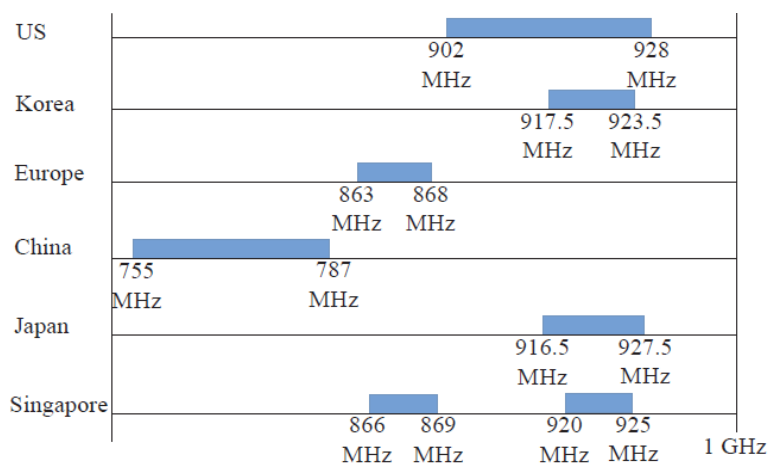


Figura 2.1: Espectro especificado para o IEEE 802.11ah [13].

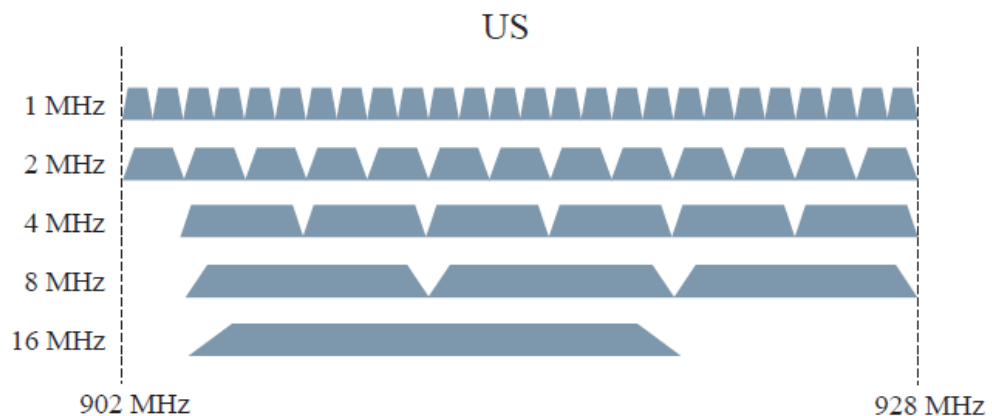


Figura 2.2: Divisão de canais para a padronização nos EUA [13].

Serviços de comunicações M2M, *Vehicle-to-Vehicle* (V2V) e de Internet das Coisas (IoT) crescem rapidamente a cada dia [6]. Atividades como monitoramento da agricultura, automação industrial, medições inteligentes e monitoramento de animais, fazem com que a comunicação de máquinas e dispositivos conectados à rede de sensores aumentem a demanda de dados para esses ambientes [5]. Há, também, um grande esforço para que esse padrão aprimore cada vez mais a sua eficiência energética, pois, uma das premissas dessa tecnologia é que a utilização seja feita em dispositivos portáteis, que tem fonte de energia limitada. Dessa maneira, trazendo maior autonomia para os aparelhos conectados à rede [14].

Sendo assim, o padrão IEEE 802.11ah surge como uma ótima solução para esse tipo de demanda, visto que sua capacidade de propagação em longas distâncias em ambientes externos aliada com sua grande eficiência energética o torna bastante atrativo.

## 2.2 IEEE 802.11ax

A tecnologia IEEE 802.11ax, também conhecido como *Wi-Fi* de alta eficiência ou *Wi-Fi 6*, é uma evolução do padrão IEEE 802.11ac (*Wi-Fi 5*), para operar nas bandas de 2,4 e 5 GHz [15]. Os principais objetivos dessa evolução são fornecer maior capacidade para a rede, alocando maior número de usuários, e melhorar sua eficiência em ambientes e cenários com alta interferência e grande quantidade de dispositivos, além da possibilidade desse padrão atender serviços de redes celulares de quinta geração (5G) [7], [8].

Esse padrão visa manter a operação altamente eficiente em ambientes densos, enquanto mantém a compatibilidade e coexistência com dispositivos dos sistemas anteriores que operam em 2,4 e 5 GHz [1]. Algumas mudanças foram propostas para alcançar esses objetivos, tais como: utilização da *Orthogonal Frequency Division Multiple Access* (OFDMA), do *downlink* para multiusuários MIMO (*Multiple Input Multiple Output*), de formação de feixes (*beamforming*), da modulação 1024-QAM (*Quadrature Amplitude Modulation*), reuso espacial, entre outras [1].

A aplicação de novas técnicas para melhoria do *Wi-Fi* fará com que esse padrão continue atuando nos nichos já conhecidos do IEEE 802.11n, mas também busca abrir novas possibilidades de mercado. As diferentes características desse sistema são avaliadas, em especial, em ambientes residenciais, empresas, edifícios, pequenas áreas de cobertura em ambientes internos e em grandes áreas de cobertura em ambientes externos e em veículos inteligentes [8]. Assim como o IEEE 802.11ah, o *Wi-Fi 6* também procura englobar as aplicações de internet das coisas e M2M à sua aplicabilidade.

A Tabela 2.1 apresenta a comparação de algumas características entre os padrões IEEE 802.11, mostrando as bandas de atuação de cada sistema, taxa de transmissão máxima pretendida, tipo de modulação, largura dos canais e o raio da área de cobertura.

Tabela 2.1: Comparação entre os padrões IEEE 802.11.

<b>Evolução</b>	<b>Banda</b>	<b>Taxa Máxima</b>	<b>Modulação</b>	<b>Largura do canal</b>	<b>Alcance</b>
a	5 GHz	54 Mbps	OFDM	20 MHz	100 m
b	2,4 GHz	11 Mbps	DSSS	20 MHz	100 m
g	2,4 GHz	54 Mbps	OFDM	20 MHz	100 m
n	2,4 / 5 GHz	600 Mbps	OFDM	20 / 40 MHz	100 m
ad	60 GHz	7 Gbps	OFDM	2 GHz	10 m
ac	5 GHz	6,9 Gbps	OFDM	20/40/80/160 MHz	100 m
af	700 MHz	569 Mbps	OFDM	6,7 / 8 MHz	1 km
ah	< 1 GHz	346 Mbps	OFDM	1/2/4/8/16 MHz	1 km
ay	60 GHz	-	OFDM	8 GHz	10 m
ax	2,4 / 5 GHz	10 Gbps	OFDMA	20/40/80/160 MHz	100 m

**Fonte:** Adaptado de [8].

É possível observar que há uma tendência de surgimento de novos padrões fora das bandas de 2,4 e 5 GHz, que já estão com o espectro congestionado, como por exemplo, os padrões ad, af, ah e ay. Observa-se, também, que o padrão ax modifica o tipo de multiplexação/múltiplo acesso utilizada pelos sistemas anteriores, passando a usar o OFDMA, que subdivide o canal *Wi-Fi* em alocações de frequência menores para transmissão paralela de usuários diferentes ao mesmo tempo [1]. Esta é uma das principais mudanças que o favorecem frente aos demais.

## 2.3 CBRS

O padrão CBRS, que opera na faixa de 3,55 a 3,70 GHz, tem uma estrutura de três camadas de usuários, além do *Spectrum Sharing System* (SAS). A primeira camada é destinada aos usuários incumbentes (operadoras), que incluem usuários federais e não federais; a segunda camada é destinada aos usuários *Priority Access License* (PAL) e a terceira camada é para os usuários de *General Authorized Access* (GAA). O SAS realiza o gerenciamento dinâmico do espectro para utilização dos usuários de acordo com a prioridade de cada um. Um dos grandes

objetivos que essa tecnologia busca é o compartilhamento de espectro, visto que, em muitas situações pode ocorrer que parte da banda privada esteja ociosa em determinadas horas do dia e em determinadas localidades. Dessa maneira, é criada uma oportunidade de compartilhamento dessa banda de frequência para alocação de serviços móveis, melhorando a eficiência espectral [11], [12], [16]. Outro fator importante, é que essa faixa tem poucas barreiras para adentrar no mercado, possibilitando novos casos de uso, além de ser mais atraente do que a utilização de serviços em *mmWave* (ondas milimétricas), pois possibilita utilizar boa parte da infraestrutura já existente. Conforme a Figura 2.3, casos de uso que podem ser amplamente utilizados são as *Neutral Host* ou redes LTE privadas. Por exemplo, um grande estádio pode desenvolver uma infraestrutura em *Neutral Host* em 3,5 GHz usando o nível GAA. Shoppings e aeroportos podem implementar redes LTE privadas com área de cobertura ampliada em substituição das redes Wi-Fi existentes, entre outros [11].

O CBRS surge como um grande candidato ao mercado das comunicações de quinta geração (5G). Contudo, a quantidade limitada de banda (150 MHz) e a baixa potência na saída do transmissor, pode ser um problema para a utilização desse serviço em redes 5G. Tendo isso em vista, a NTIA (*National Telecommunications and Information Administration*) e outras agências federais dos EUA tem trabalhado para liberar uma banda de 100 MHz (3,45-3,55 GHz) imediatamente abaixo da faixa do CBRS, para totalizar uma banda de 250 MHz quando somada a banda CBRS (3,45-3,70 GHz). Dessa maneira, tornando-se mais competitiva e atrativa frente a outros países, que disponibilizam bandas de até 300 MHz na faixa intermediária para esse fim [17].

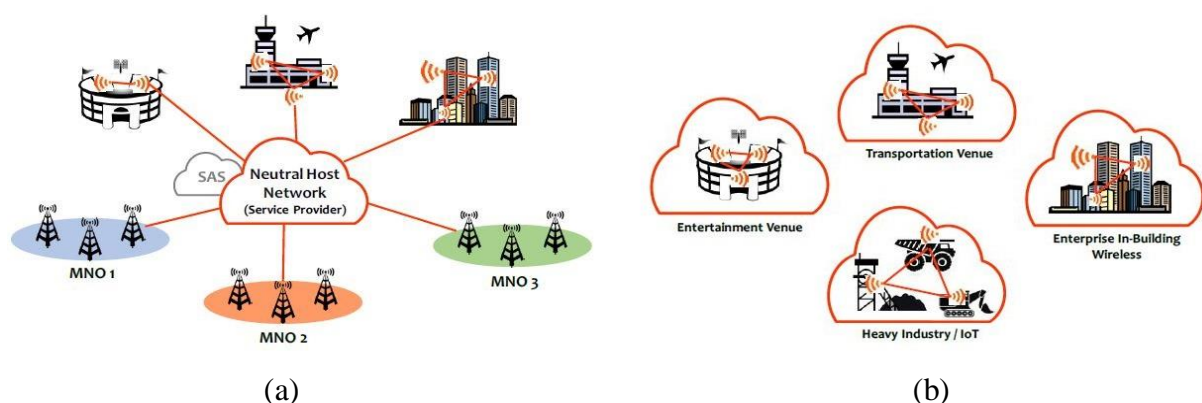


Figura 2.3: Casos de uso para o CBRS: (a) *Neutral Host* e (b) Redes LTE privadas [11].

---

## Capítulo 3 - Estado da Arte

---

Nesse capítulo será apresentado o estado da arte com os principais trabalhos que foram a base e o ponto de partida para o entendimento de projetos de antenas de microfita para operação em múltiplas bandas. A maior parte destes tem o objetivo de projetar antenas da maneira menos complexa possível, visto que menor complexidade está quase sempre aliada a custo reduzido, sendo esse um fator importante para o desenvolvimento de estruturas que possam ser aplicadas ao mercado.

O trabalho realizado em [18], trata de uma antena *dual-band* de baixo perfil idealizada para uso em *laptops* na faixa do WLAN. Foi utilizado um *patch* no formato “T” para alcançar bandas em 2,45 e 5 GHz. Os braços horizontais do ressoador são de tamanhos diferentes, aproximadamente um quarto de comprimento de onda da frequência de ressonância desejada, quando somadas à base vertical. Foi utilizada, ainda, uma *strip* (linha) em formato “L” para melhoria do casamento de impedância. A técnica utilizada para o surgimento das duas bandas foi a de introduzir *strips* da ordem de grandeza das frequências desejadas e ajustar o restante da estrutura para ter um bom casamento de impedância.

Em [19], uma antena de microfita *dual-band* de baixo perfil e fácil fabricação para operação no padrão IEEE 802.11 (WLAN) em 2,4 e 5,2 GHz foi projetada, conforme é apresentada na figura 3.1. A antena tem dimensão total de 75x64,5 mm<sup>2</sup>, espessura do substrato de 0,8 mm e permissividade elétrica relativa de 4,4. O trabalho consiste em formar o *patch* com um duplo “T” empilhado de diferentes tamanhos para alcançar as frequências de ressonâncias desejadas. Além de realizar um truncamento no plano de terra para melhoria do casamento de impedância da estrutura e aumento da largura de banda. Os braços (*arms*) do *patch* tem percurso total próximo a 25% do comprimento de onda da onda incidente. A tabela 3.1 apresenta as dimensões dos elementos do *patch*.

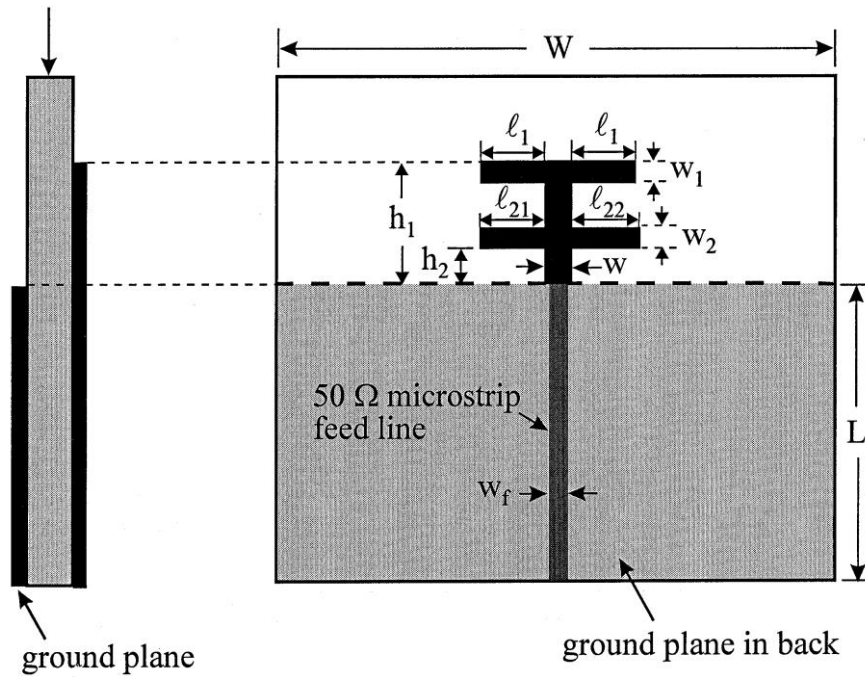


Figura 3.1 – Geometria da estrutura proposta em [19].

Tabela 3.1: Dimensões dos elementos do *patch*.

	$l_{21} - l_{22}$ (mm)	$w - w_1 - w_2$ (mm)
Antena de referência	0 – 0	1,5 – 1,5 – 0
Antena 1	7,3 – 7,3	1,5 – 1,5 – 1,5
Antena 2	7,3 – 7,3	3,5 – 3,5 – 3,5
Antena 3	6,3 – 8,3	3,5 – 3,5 – 3,5
Antena 4	7,3 – 7,3	3,5 – 1,5 – 3,5

**Fonte:** Adaptado de [19].

Foi realizada uma investigação nas diferentes espessuras e comprimentos das seções do *patch* para avaliar a influência das alterações feitas e o resultado da perda de retorno pode ser observado na figura 3.2.

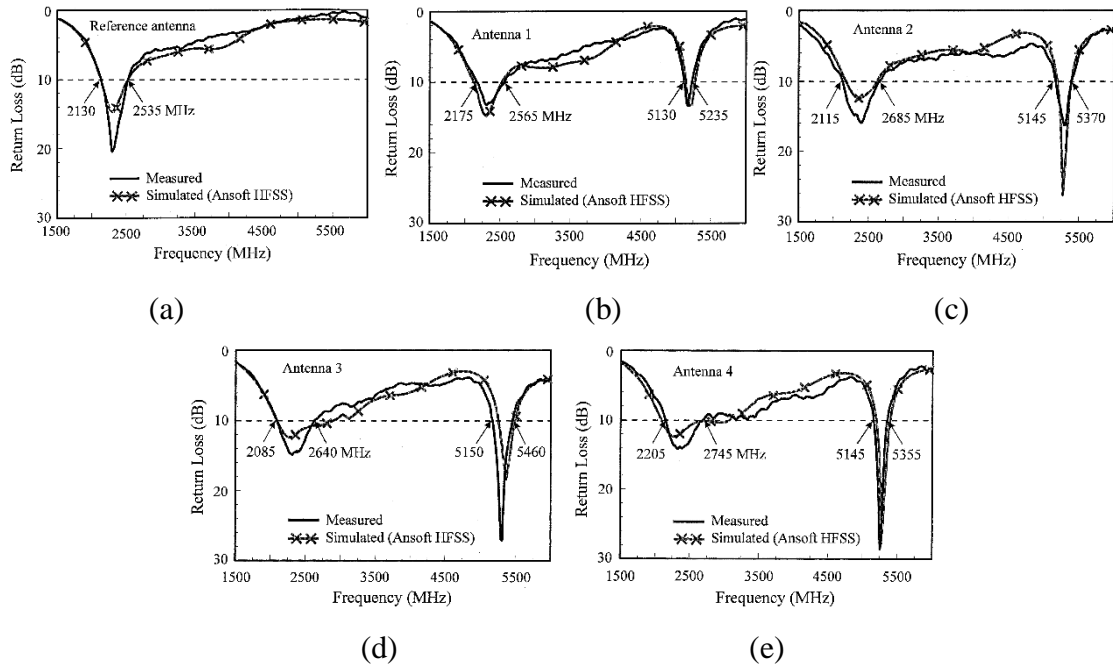


Figura 3.2 – Gráficos das perdas de retornos para as diferentes configurações da estrutura proposta em [19].

Foi visto que com o aumento da espessura das *strips* a largura de banda pode ser efetivamente melhorada. Este comportamento é muito similar ao conhecido princípio que retrata que quanto mais grosso o dipolo de fio, maior é a largura de banda alcançada. Outra observação importante é que mesmo com as *strips* de diferentes comprimentos (assimetria dos elementos) inseridas na “antena 3” (Figura 3.2d), não houve deslocamento na ressonância central, o que evidencia a importância do comprimento elétrico da estrutura.

O artigo [20] aborda uma antena *patch* de baixo perfil e baixo custo de fabricação para utilização em sistemas WLAN e WiMAX, cuja dimensão total é de 48x60 mm<sup>2</sup> e o substrato tem espessura de 0,8 mm e permissividade elétrica relativa de 4,4. Foi utilizado um monopolo retangular com alimentação por linha de microfita e truncamento no plano de terra para ressonância em 3,2 GHz (modo fundamental) e um outro modo de ordem mais alta em 7,3 GHz. Para alcançar as faixas desejadas, utilizou-se um elemento trapezoidal abaixo do elemento radiante para criar perturbações na ressonância. Dessa maneira, foi possível aumentar a largura de banda e reduzir a ressonância de ordem superior, englobando as faixas de interesse. O trabalho ainda fez análises de respostas por meio da variação das dimensões do elemento trapezoidal.

Em [21], utilizou-se um monopolo contendo duas *strip lines* cruzadas no plano de terra *slotted* para utilização em sistemas WLAN em 2,45 e 5,2 GHz. A antena tem 40x40 mm<sup>2</sup> de dimensão total e o substrato tem 0,7 mm de espessura e constante dielétrica de 4,2. A intenção

das linhas cruzadas foi aumentar o percurso da distribuição de corrente para formação de duas bandas de ressonância. A antena de referência tem apenas uma banda centrada em aproximadamente 4 GHz, utilizando apenas o *slot* no plano de terra. Após a inserção das *strips* cruzadas, variou-se o parâmetro  $\alpha$  (ângulo) e o parâmetro  $L_1$  (comprimento da *strip* após a interseção das duas linhas) para análise do comportamento da estrutura. Verificou-se que com o aumento de  $\alpha$ , as duas bandas de ressonância se aproximavam, ou seja, a faixa de frequência inferior subiu, enquanto a faixa superior teve seu valor reduzido. O parâmetro  $L_1$  diminui a ressonância da primeira banda à medida que seu comprimento aumenta e praticamente não tem influência na banda superior em 5,2 GHz. Tal fato é comprovado pelas figuras de distribuição de corrente apresentadas em [21].

O trabalho [22] trata de uma antena *patch dual-band* com alimentação por guia de onda coplanar (*Coplanar Waveguide* - CPW) utilizando *slots* no elemento radiante para fornecer banda adicional para atuação em WLAN. A estrutura tem dimensões totais de 32x24 mm<sup>2</sup> e o substrato tem espessura de 1,59 mm com permissividade elétrica relativa de 4,4. Foi adicionado um *slot* em formato “T” além de uma *strip* (elemento capacitivo) no *patch*, no qual foi possível o surgimento da banda inferior do WLAN, em 2,45 GHz. Essa configuração do elemento capacitivo foi inspirada em um metamaterial, para um índice de refração próximo a zero. A antena desempenhou comportamento adequado, além de ter baixo custo e facilidade na fabricação.

Uma antena *patch* retangular com dois *slots* e plano de terra truncado com um *slot* “T” invertido para aplicações em UWB (*ultra wideband*) foi desenvolvida em [23]. A estrutura tem baixo perfil, baixo custo e é de fácil fabricação. Sua dimensão é de 12x18x1,6 mm<sup>3</sup> e o substrato tem permissividade elétrica relativa de 4,4. O estudo propôs truncar o plano de terra e inserir *slots* no *patch* para aumentar a largura de banda e otimizar o casamento de impedância. Após isso, foram feitas análises paramétricas do tamanho do *slot* “T” invertido e dos *slots* inseridos no *patch* para otimização dos resultados. Os *slots* do *patch* são responsáveis por produzir duas novas ressonâncias próximas, o que causou o aumento da largura de banda da estrutura final. Os resultados simulados e medidos estiveram em boa concordância.

O trabalho [24] trata de uma antena de microfita *dual-band* para utilização em sistemas WLAN. A estrutura tem dimensão de 38x38 mm<sup>2</sup> e substrato com espessura de 1 mm, enquanto a permissividade elétrica relativa é de 2,65. Ela foi projetada com um elemento radiante em formato “T” e um *slot* aberto no plano de terra com dois tocos em formato “L”. O elemento radiante foi projetado para ressonar na banda de 5 GHz, enquanto o *slot* com os tocos em “L”

para ressonar em 2,45 GHz. Os elementos responsáveis pelas ressonâncias nas duas bandas atuam de forma quase independentes. Foram realizadas variações no elemento radiante, assim como no tamanho dos tocos em “L” e verificou-se que a variação de um ou outro parâmetro pouco influencia na outra banda de ressonância. Nesse projeto, os parâmetros foram otimizados para que a antena operasse nas bandas do WLAN (2,45 e 5 GHz).

Em [25] foi desenvolvida uma antena monopolar com o ressoador em formato “T” com plano de terra truncado e um toco em formato “h” para fornecer uma nova banda de ressonância para atuação *dual-band* em WLAN. A antena tem dimensão de  $20 \times 28 \text{ mm}^2$  e seu substrato tem 1 mm de espessura e constante dielétrica de 2,65. O ressoador é projetado para operar na banda de 5 GHz, enquanto o toco em formato “h” inserido no plano de terra é responsável por gerar um novo modo ressonante em 2,45 GHz. O trabalho também apresenta variação nas dimensões do toco e sua influência na resposta final da estrutura. Com o uso do toco foi possível miniaturizar a antena, além de mantê-la com baixo perfil e baixo custo de fabricação. O estudo foi validado mediante o protótipo construído e de suas medições, que apresentaram boa concordância com os resultados simulados no *software* comercial *Ansoft HFSS*.

O artigo [26], discorre sobre uma antena *tri-band* de microfita com *slots* no plano de terra para atuação em sistemas WLAN e WiMAX. A estrutura tem dimensão total de  $35 \times 30 \times 1,6 \text{ mm}^3$  e substrato com permissividade relativa de 4,4. A Figura 3.3 apresenta a geometria da antena.

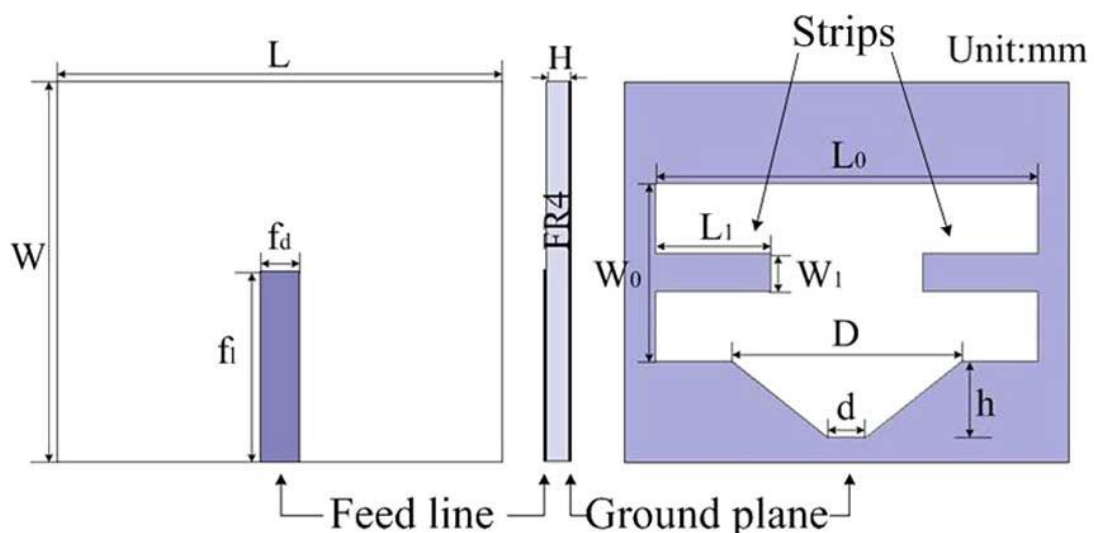


Figura 3.3 – Geometria da antena proposta em [26].

Trata-se de uma antena de fácil fabricação e baixo custo. Em um lado do substrato tem apenas a linha de microfita de alimentação e do outro lado há o plano de terra com os *slots* retangular e trapezoidal, além de duas *strips* inseridas no *slot* retangular. A Figura 3.4 apresenta o gráfico da perda de retorno da antena proposta sem os *slots*, com os *slots*, mas sem as *strips* e por fim a estrutura completa, além do resultado da medição do protótipo. A ressonância inferior é dada pelo *slot* retangular, a intermediária é dada pelas *strips* horizontais e a banda superior é dada pelo *slot* trapezoidal. Leves ajustes nas dimensões das *strips* e do *slot* trapezoidal foram feitos para melhoria do casamento de impedância. A estrutura obteve bom comportamento nos valores simulados e medidos com bons ganhos e características de radiação.

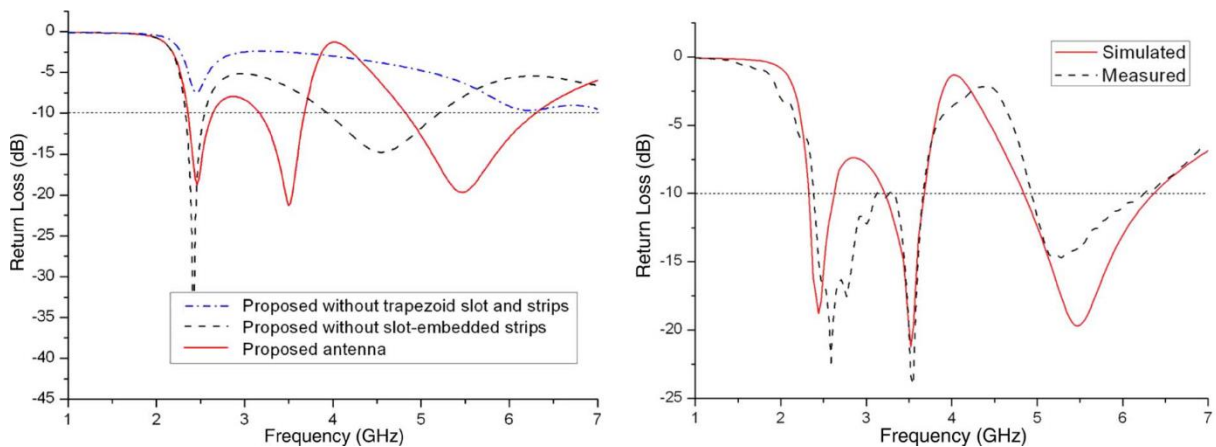


Figura 3.4 – Gráfico da perda de retorno para a estrutura do trabalho [26].

O trabalho [27] trata de uma antena *patch* retangular com dois “L”s invertidos e plano de terra com defeitos (*Defected Ground Structure* - DGS) para operação *tri-band* em WLAN e WiMAX. A geometria da antena proposta é apresentada na Figura 3.5. As dimensões totais da antena são  $30 \times 20 \times 1,6 \text{ mm}^3$  e permissividade relativa de 4,4. O projeto consiste na inserção de defeitos no plano de terra os quais foram responsáveis pela ressonância na banda inferior. Duas linhas em formato de “L” invertido foram inseridas na parte superior do *patch* retangular para alcançar a banda intermediária de 3,5 GHz e o elemento vertical adicionado à linha de alimentação promoveu a excitação em 5 GHz. Variações nas dimensões do *slot* do plano de terra permitem o ajuste fino da frequência de ressonância inferior e superior, enquanto variações nas fitas “L” invertido são responsáveis pelo ajuste fino da banda intermediária. Essa conclusão foi possível devido à análise da distribuição de corrente na estrutura para as diferentes

frequências de ressonância, que permitiu analisar quais as partes da antena que mais influenciavam no resultado final.

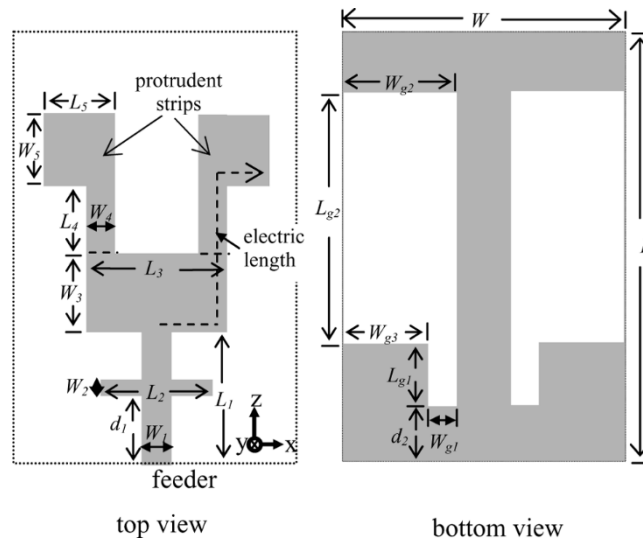


Figura 3.5 – Geometria da estrutura proposta em [27].

Como pode ser observado na figura 3.6, para a estrutura (ii) não houve bandas ressonantes, a estrutura (iii) apresentou certa tendência de ressonância em 2,4 e 5 GHz e a antena (iv) ressonou em duas bandas, sendo elas 2,4 e 3,8 GHz, e demonstrou certa tendência para ressonar em 5 GHz. À antena proposta (i) foi inserido um elemento vertical na linha de alimentação que foi o responsável por aprimorar a estrutura para operar satisfatoriamente na banda de 5 GHz.

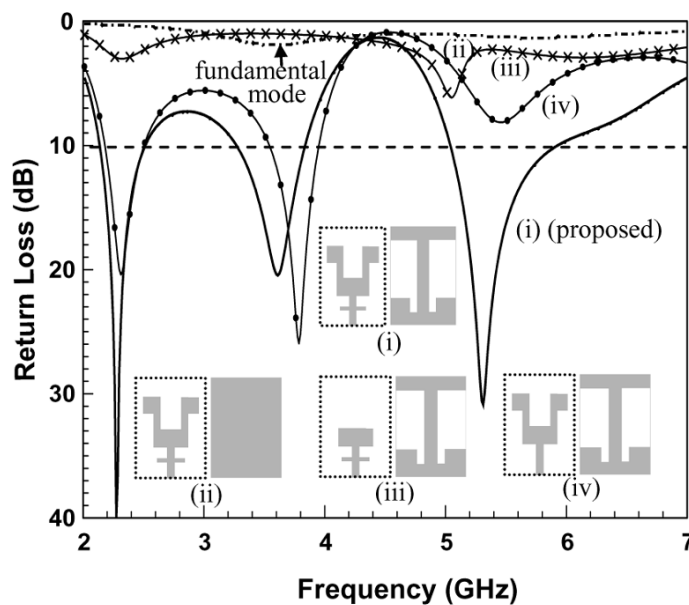


Figura 3.6 – Perda de retorno para a estrutura proposta em [27].

Em [28] foi projetada uma antena planar com alimentação por guia de onda coplanar (CPW) *tri-band* para operação em WLAN e WiMAX. Sua dimensão total é de 28x32 mm<sup>2</sup> e o substrato, com permissividade relativa de 4,4, tem 1 mm de espessura. A estrutura é formada pela linha de alimentação terminada com um *patch* circular e plano de terra com *slot* quadrado e duas *strip* simétricas em formato de “L”. Por meio da análise da distribuição de corrente é possível verificar que o *patch* circular é responsável pela ressonância na faixa intermediária, enquanto o *slot* fornece uma banda na faixa inferior e as *strips* simétricas conduzem a estrutura para a ressonância em 5,2 GHz. Com essa configuração foi possível construir uma antena de baixo perfil, fácil de fabricar e baixo custo. Os resultados foram validados por intermédio da construção do protótipo e de suas medições.

Uma antena de microfita *slot* para aplicações UWB e bandas extras para sistemas GSM, GPS e Bluetooth foi apresentada em [29]. A estrutura tem dimensões compactas de 25x28 mm<sup>2</sup> construída sobre um substrato de 0,8 mm de espessura e permissividade elétrica relativa de 4,4. O *patch* de alimentação tem formato chanfrado na base e degraus na parte superior e o plano de terra é composto por um *slot* octogonal com faixas em formato “U” invertido. A antena base, formada apenas pelo *patch* e pelo *slot* no plano de terra, é responsável pela banda ultra larga. Para a criação das bandas adicionais para os sistemas mencionados acima, foram inseridas faixas no formato “U” invertido ao plano de terra. Cada faixa tem comprimento total em torno de um quarto do comprimento de onda da frequência de ressonância desejada. Sendo assim, foram inseridas três faixas, cada uma nas dimensões equivalentes para os sistemas desejados. Foram feitos, também, variações nas dimensões das faixas para observar a variação da ressonância e influência nas outras bandas. Foi visto que cada faixa opera sem afetar as outras bandas de ressonância.

Em [30], é realizado o projeto de uma antena *dual-band* de microfita para utilização em sistemas WLAN. A dimensão total da antena é de 40x30x1,80 mm<sup>3</sup> e o seu substrato tem permissividade elétrica relativa de 3,5. O *patch* da estrutura tem formato “L” e “E” que são separados por um *gap* e foi realizado um truncamento no plano de terra. As configurações “L” e “E” foram projetadas para terem comprimento total próximo de um quarto de comprimento de onda da frequência de ressonância desejada. O elemento “L” foi projetado para a frequência de 5,4 GHz e o elemento “E” para a banda de 2,45 GHz. Há, também, uma conexão, através do substrato, entre o elemento “E” e o plano de terra. Também foi realizado um estudo de variação de alguns parâmetros do *patch* para verificar a mudança e influência que cada seção dos elementos radiantes produz nas bandas de ressonância. Este trabalho também investigou a

influência do cabo utilizado nas medições práticas e do encapsulamento da antena utilizando tela de LCD (*Liquid Crystal Display*).

O trabalho realizado em [3] é sobre uma antena de microfita *quad-band* com *slot* e tocos em formato “T” e “E” no plano de terra para alcançar ressonância para utilização nos sistemas de GPS, WLAN e WiMAX. A dimensão total da estrutura é de 44x56 mm<sup>2</sup>, fabricada sob um substrato de permissividade elétrica relativa 3,5 e espessura de 0,8 mm. A figura 3.7 apresenta a geometria da antena proposta.

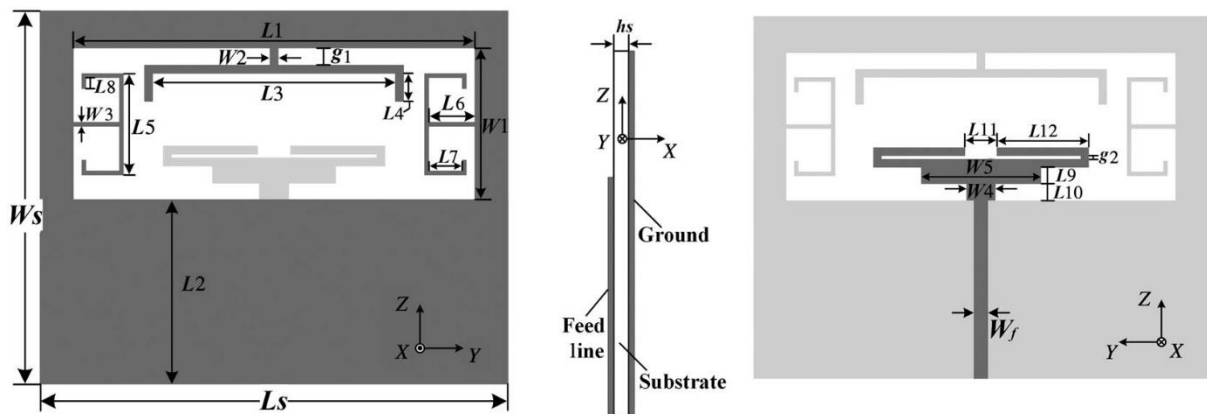


Figura 3.7 – Geometria da antena proposta em [3].

Inicialmente, foi projetada a linha de alimentação em formato “T” com seus braços dobrados (para reduzir as dimensões do *patch*) e foi feito um *slot* no plano de terra. No *patch* de alimentação foram inseridos braços dobrados para que ocorresse ressonância de ordem superior em 5,4 GHz, além da ressonância em 3,5 GHz proveniente da própria linha de alimentação. O *slot* é o principal responsável pelo aparecimento da primeira banda de ressonância em torno de 1,8 GHz. Contudo, com um casamento de impedância ainda pobre. A partir disso, foi colocado um toco em “T” invertido na borda superior do *slot*, no qual reduziu um pouco a ressonância da primeira banda e melhorou significativamente o casamento de impedância. Em seguida, foram inseridos dois tocos em formato “E” nas bordas laterais do *slot*, estes foram responsáveis pela formação da ressonância em 2,45 GHz. Foi realizado, ainda, um estudo paramétrico em que foi variado diversos parâmetros do *patch* e tocos para verificar o *range* de frequências em que a antena pode ser modificada para atuar. A figura 3.8 ilustra a perda de retorno do processo de construção da antena.

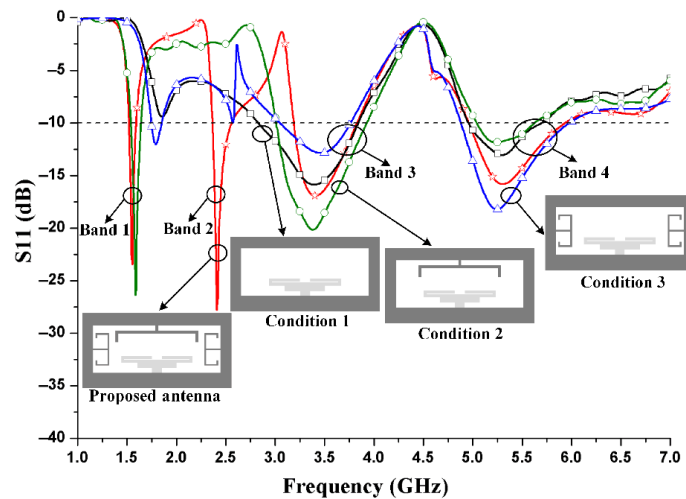


Figura 3.8 – Perda de retorno para as estruturas analisadas em [3].

O trabalho [31] apresenta uma antena de microfita *tri-band* com dupla polarização para utilização em sistemas WLAN (2,45 GHz), Banda S (3 GHz) e WiMAX (3,4 GHz). A dimensão total da antena é de  $31 \times 31 \times 1,6$  mm<sup>3</sup>, disposta sobre um substrato de permissividade elétrica relativa de 4,4. A antena é composta da linha de alimentação e de *slots* no plano de terra. Os *slots* têm formato de “L” e de “C”, além de um *slot* retangular em *loop*. Os *slots* “L” e “C” são responsáveis pelas ressonâncias em 3 e 3,32 GHz, respectivamente. Enquanto o *slot* em *loop* fornece a banda de 2,45 GHz. São apresentados resultados da razão axial das bandas e observa-se que a banda de 3,32 GHz tem polarização circular. Este comportamento foi atribuído à interação dos *slots*.

O trabalho [32] apresenta uma antena com reconfiguração em frequência para operação em aplicações de LTE e WLAN. A antena tem dimensão total de  $50 \times 50 \times 1,6$  mm<sup>3</sup> e substrato de FR-4 com permissividade elétrica relativa de 4,5. A antena é feita com um elemento radiante principal conectado a uma extensão desse elemento mediante a conexão com o diodo PIN. Dessa maneira, é possível alterar o comprimento elétrico do elemento radiante, possibilitando a variação da frequência por meio do estado do diodo: ligado (ON) ou desligado (OFF). Inicialmente, é realizada a medição da estrutura apenas com o elemento radiante principal. Nessa configuração, ocorreu a ressonância em 5,2 GHz. Na segunda situação, realizou-se a medição da estrutura com o elemento radiante principal juntamente com a extensão (nesse caso, atuando como elemento parasita) e o diodo no estado OFF. A frequência de ressonância ficou centrada em 5,3 GHz, verificando um leve deslocamento em relação a situação anterior. Na última configuração, foi utilizado o diodo no estado ON. Dessa maneira, a estrutura apresentou

ressonância na faixa de 2,7 GHz e 5,2 GHz, tornando-se uma estrutura *dual-band*. Sendo assim, a reconfiguração foi realizada mediante a utilização de um diodo PIN.

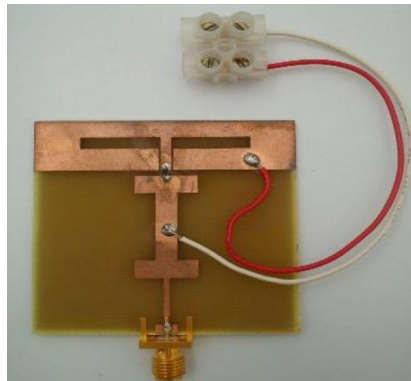


Figura 3.9 – Protótipo da antena reconfigurável construído em [32].

Em [33], que serviu de inspiração para a reconfiguração deste trabalho, foi realizado o projeto de uma antena compacta multibanda com frequência reconfigurável para atuação em aplicações de WLAN e WiMAX. A estrutura tem dimensões totais de  $50 \times 45 \times 1,6 \text{ mm}^3$ , construída sobre um substrato de FR-4 e foi utilizado dois diodos PIN para promover a reconfiguração das frequências. A antena é formada pelo elemento radiante principal (monopolo) e dois elementos parasitas, na qual será feita a conexão através dos diodos para alterar a distribuição de corrente na superfície do elemento, e conseqüentemente, alterar a frequência de operação. Sendo assim, haverá quatro configurações para a estrutura: a) diodo 1 OFF e diodo 2 OFF; b) diodo 1 OFF e diodo 2 ON; c) diodo 1 ON e diodo 2 OFF; d) diodo 1 ON e diodo 2 ON. Na configuração (a), houve ressonâncias em 3,2 e 5,3 GHz. Na (b), obteve-se ressonâncias em 2,4, 4,2 e 5,1 GHz. Na formação (c), tem-se as faixas em 3,3 e 5,4 GHz e na última configuração (d) houve aparecimento das ressonâncias em 2,2, 4,48 e 5,3 GHz. Sendo assim, foi realizada a reconfiguração em frequência da estrutura apresentada por meio de dois diodos PIN.

No trabalho [34], foi apresentada uma antena de microfita *patch* retangular com um *slot* retangular no plano de terra. A dimensão da estrutura é  $60 \times 68,5 \times 1,52 \text{ mm}^3$  e foi construída sobre um substrato de tacônico RF35 que tem permissividade elétrica relativa de 3,5. Utilizou-se três diodos PIN no *slot* do plano de terra. Com essa configuração, foram analisados seis estados diferentes, que apresentaram os seguintes resultados: a) 2,49 GHz para o estado OFF-OFF-OFF; b) 2,67 GHz para o estado ON-OFF-OFF; c) 2,88 GHz para o estado ON-OFF-ON; d) 3,25 GHz para o estado OFF-ON-OFF; e) 3,36 GHz para o estado ON-ON-OFF e f) 3,49 GHz para o estado ON-ON-ON. A estrutura foi capaz de operar em seis frequências reconfiguráveis dentro do intervalo de 2,49 a 3,49 GHz por meio da utilização de diodos PIN.

# Capítulo 4 - Projeto e Desenvolvimento das Antenas de Microfita

---

Neste capítulo será apresentado o projeto e desenvolvimento da antena de microfita multibanda para os sistemas IEEE 802.11ah e IEEE 802.11ax e, em seguida, o desenvolvimento da antena de microfita multibanda reconfigurável para os sistemas IEEE 802.11ah, IEEE 802.11ax (faixa inferior em 2,4 GHz) e CBRS.

## 4.1 Antena para os Sistemas IEEE 802.11ah e IEEE 802.11ax

Diante das pesquisas, estudos e testes realizados previamente, foi dado início ao projeto de uma antena de microfita multibanda para atender aos padrões de comunicações sem fio em questão. Nesse caso, é necessário projetar uma antena que tenha ressonância em três bandas de frequências diferentes, em 900 MHz, 2,4 GHz e 5 GHz.

De acordo com o estudo realizado, verificou-se que, geralmente, o *patch* é projetado para ressoar na menor banda de frequência de operação da antena, pois este é o elemento que, provavelmente, terá as maiores dimensões, visto que a frequência é inversamente proporcional ao comprimento de onda. Para este trabalho, optou-se pelo projeto de um monopolo planar pela simplicidade frente a outras geometrias. Tendo em vista essa observação, o procedimento padrão seria projetar o monopolo para a faixa de 900 MHz. Contudo, o objetivo do trabalho é também realizar um projeto de antena miniaturizada. Caso o ponto de partida do *design* fosse dado para o *Wi-Fi HaLow*, a construção já iniciaria com dimensões elevadas, indo de encontro ao que tem sido proposto.

Portanto, a ideia inicial foi projetar o monopolo para a banda de 2,4 GHz, que é a banda inferior do sistema IEEE 802.11ax e a segunda menor frequência que estará em operação na antena. Foi projetado um monopolo de  $\lambda/4$  para a faixa de 2,4 GHz com a utilização de substrato de FR-4 com permissividade elétrica relativa 4,4 e tangente de perdas 0,02. O substrato tem dimensões de 35x56x1,6 mm<sup>3</sup>. Foram escolhidas estas dimensões para manter a estrutura miniaturizada e conseguir acomodar todos os elementos necessários para o projeto. A Figura

4.1 apresenta o monopolo sobre o plano de terra completo. As dimensões dos elementos da antena são:  $W = 35$  mm,  $L = 56$  mm,  $w_f = 2,5$  mm,  $l_f = 30$  mm.

Como pode ser visto na Figura 4.2, o resultado da simulação realizada no *ANSYS HFSS* não apresentou nenhuma ressonância próximo da banda desejada. Então, foi inserido um *slot* no plano de terra com o intuito de provocar perturbações próximo da faixa de frequência esperada, conforme havia sido observado na literatura [3], [4], [21], [24], [27], [28] estudada no desenvolvimento deste trabalho.

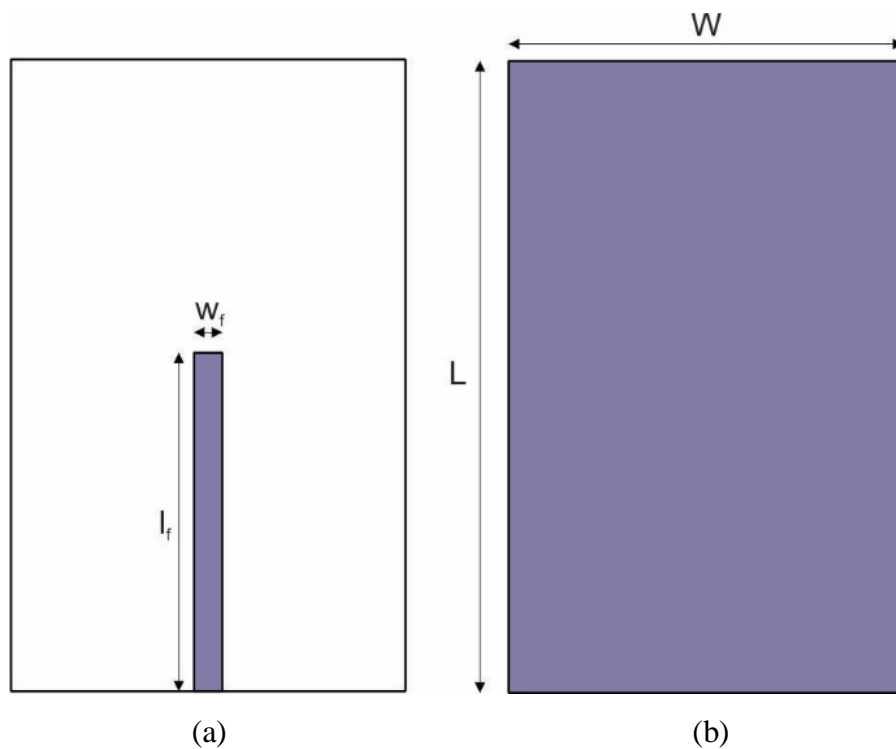


Figura 4.1 – Geometria da estrutura para operação na banda de 2,4 GHz. a) Vista frontal, b) Vista posterior.

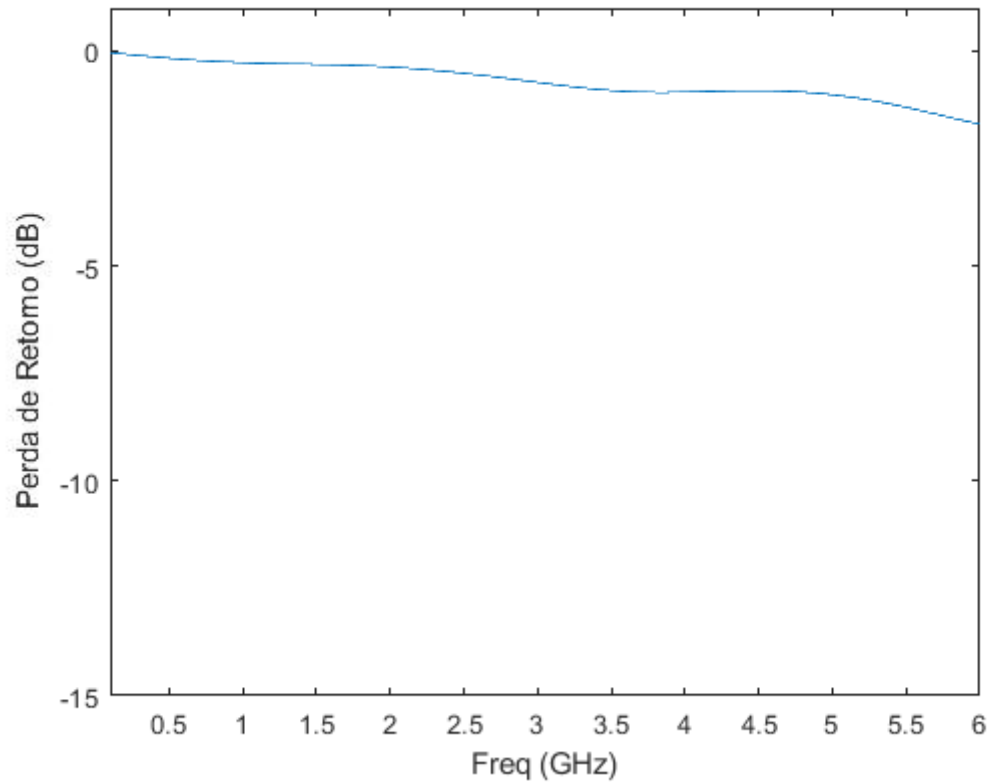


Figura 4.2 – Perda de retorno simulada para o monopolo com plano de terra completo.

Inicialmente, foi inserido um *slot* quadrado com dimensão lateral  $L_0 = 30$  mm e  $W_0 = 30$  mm. Contudo, não foi alcançado o resultado esperado, como indicado na Figura 4.3. Logo, foram realizados testes paramétricos no *slot* para ajustar suas dimensões e conseguir a ressonância na faixa correta. A figura 4.4 apresenta a geometria do *slot*.

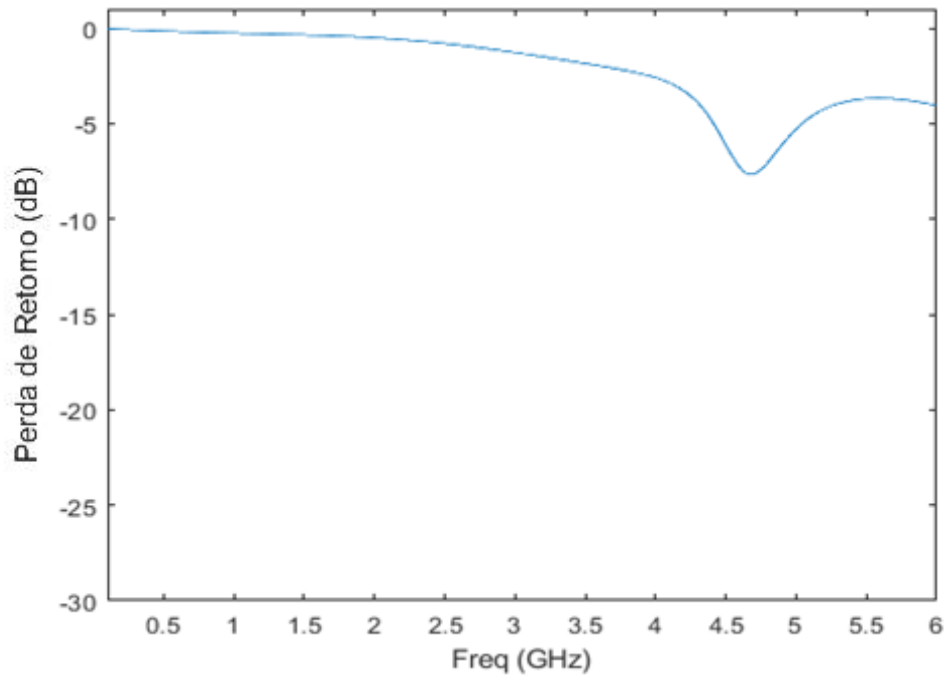


Figura 4.3 – Gráfico da perda de retorno simulada da estrutura com *slot* 30x30 mm<sup>2</sup>.

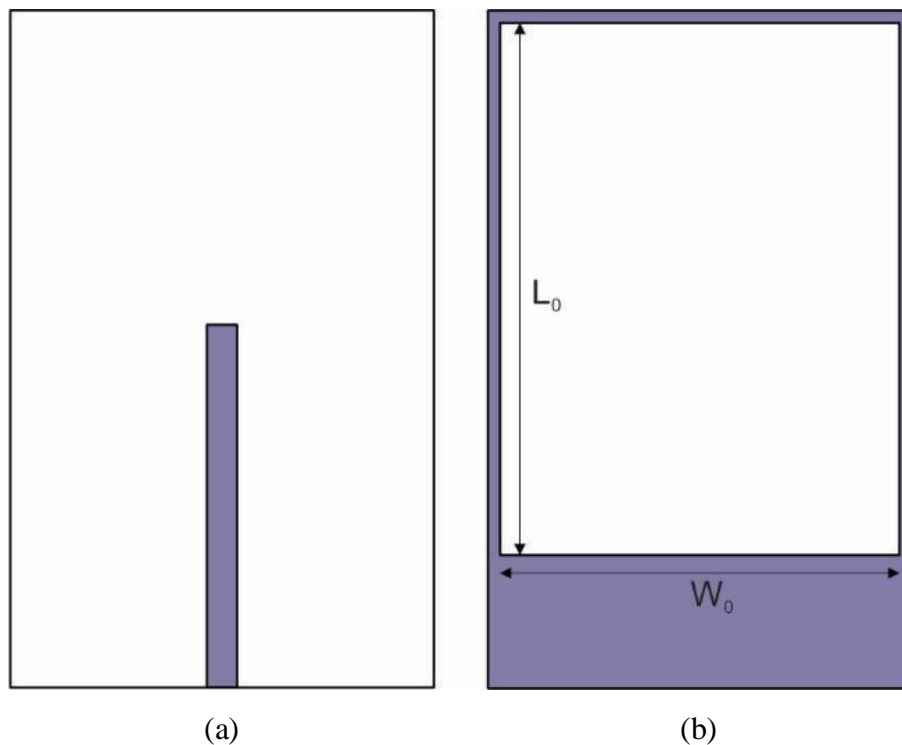
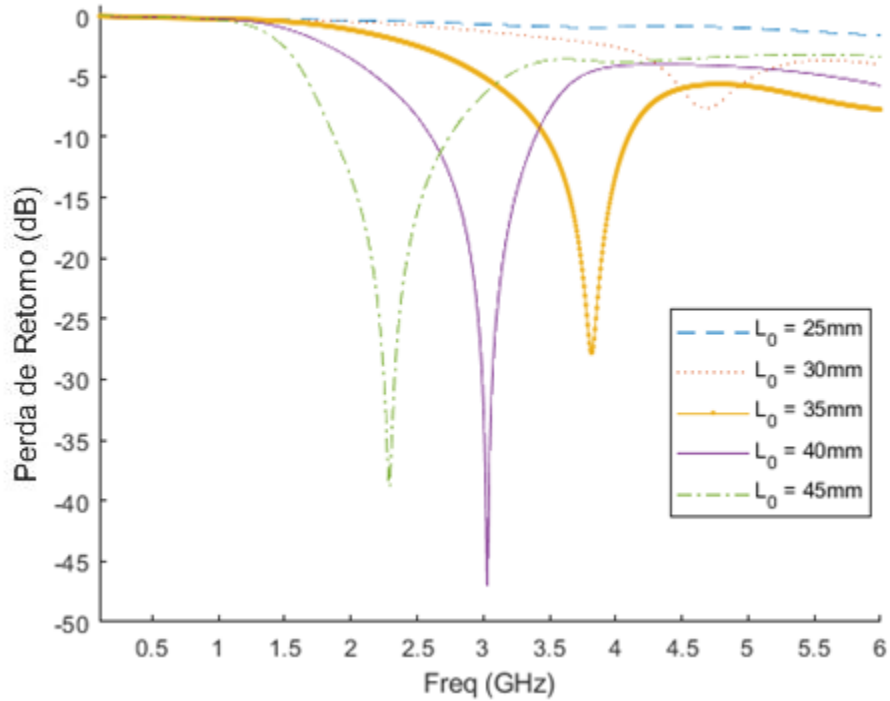


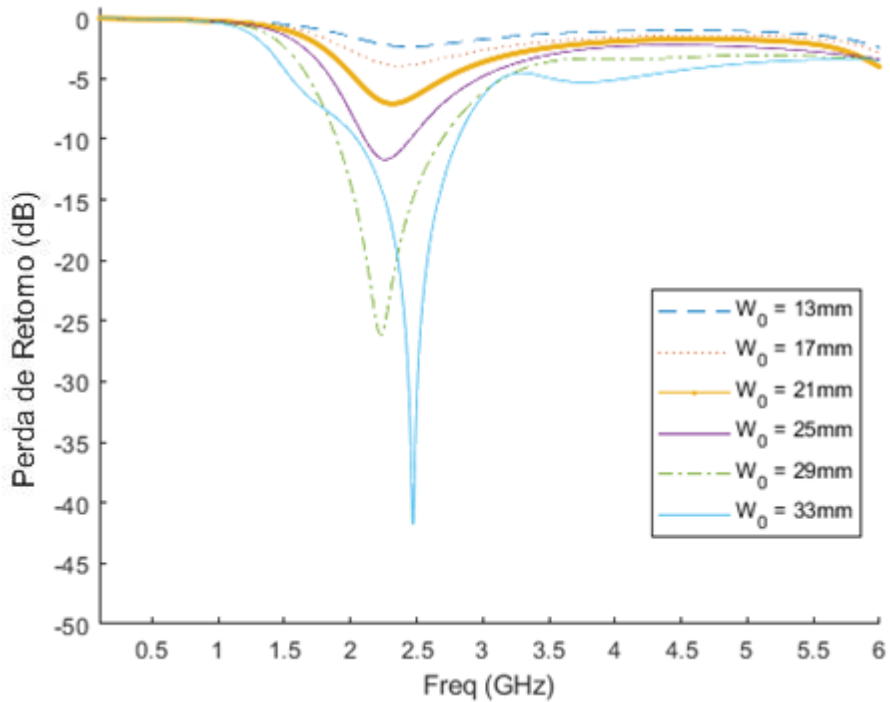
Figura 4.4 – Geometria do *slot* no plano de terra. a) Vista frontal, b) Vista posterior.

A Figura 4.5a apresenta a análise da perda de retorno simulada mediante a variação da dimensão  $L_0$  enquanto fixou-se o valor de  $W_0 = 30$  mm. Observa-se que a estrutura obteve bons resultados para valores de  $L_0$  iguais a 35, 40 e 45 mm. Porém, a que mais se aproxima da faixa

de 2,4 GHz é  $L_0 = 45$  mm. O próximo passo foi variar a dimensão  $W_0$  enquanto foi mantido fixo o  $L_0$  em 45 mm. A Figura 4.5b apresenta o resultado dessa variação. Observa-se que o melhor valor para a banda requisitada é  $W_0 = 33$  mm.



(a)



(b)

Figura 4.5 – Resultado da perda de retorno da análise paramétrica variando a dimensão (a)  $L_0$  e fixando  $W_0 = 30$  mm e variando a dimensão (b)  $W_0$  e fixando  $L_0 = 45$  mm.

Após a análise paramétrica, foi escolhido a utilização de um *slot* retangular resultante com dimensões de  $W_0 = 33$  mm e  $L_0 = 44$  mm. Observa-se na Figura 4.6 que, com essa configuração, o objetivo inicial foi alcançado e a estrutura apresenta boa perda de retorno em toda a banda inferior do sistema IEEE 802.11ax, considerando o limiar de -10 dB para o parâmetro  $S_{11}$ . Os resultados indicam que a antena apresentou uma ressonância na frequência de 2,55 GHz, com um valor de perda de retorno igual a -33 dB e uma largura de banda igual a 767 MHz. O próximo passo é alcançar a ressonância em 900 MHz para o *Wi-Fi HaLow*.

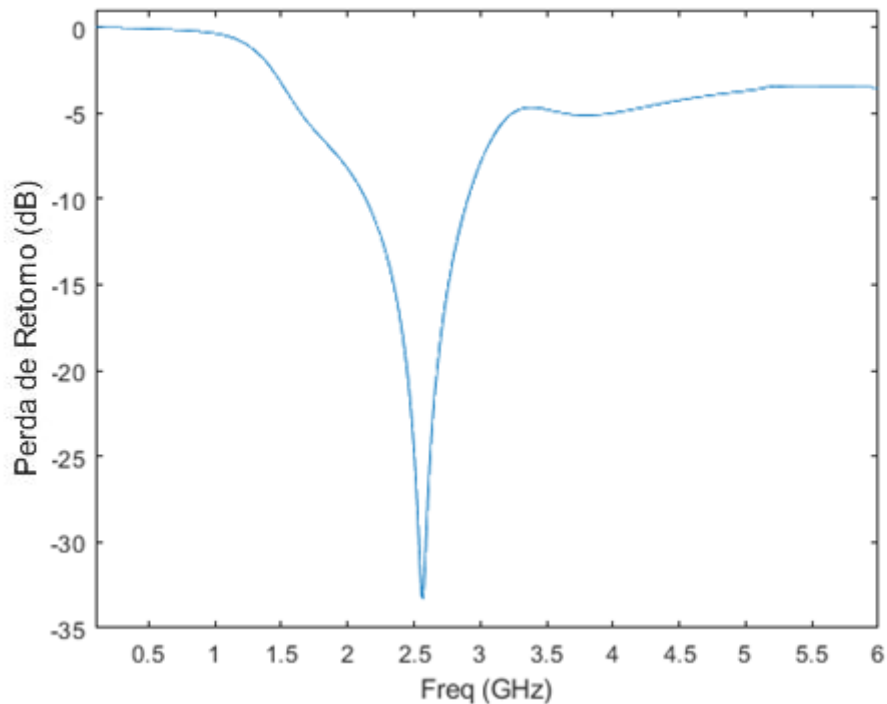


Figura 4.6 – Perda de retorno para a estrutura com *slot* retangular no plano de terra.

Para estimular a ressonância em 900 MHz, foi inserida uma faixa (*strip*) vertical no *slot* do plano de terra, conforme visto na Figura 4.7. Levando em consideração que um quarto do comprimento de onda da onda incidente para 900 MHz é aproximadamente 83 mm, a *strip* vertical inserida tem comprimento de 26 mm, que quando somada às dimensões da borda, leva ao comprimento elétrico total do elemento em torno de  $26 + 15 + 44 = 85$  mm, que é aproximadamente um quarto do comprimento de onda desejado. A Figura 4.8 apresenta o resultado da perda de retorno. As dimensões da *strip* vertical são:  $L_1 = 26$  mm,  $W_1 = 2,5$  mm.

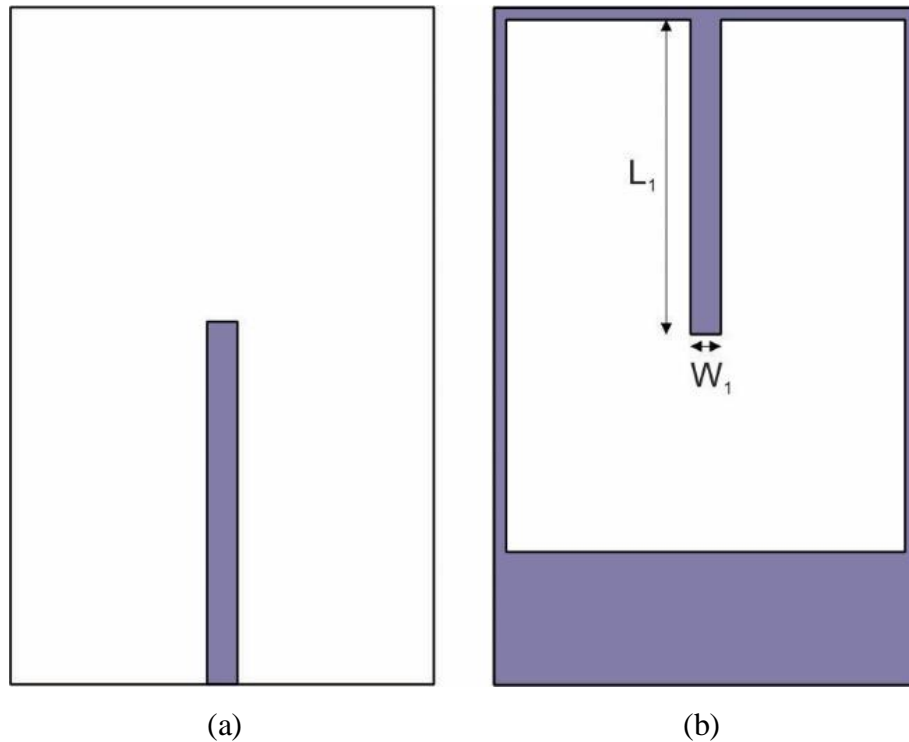


Figura 4.7 – Geometria da *strip* inserida no *slot* do plano de terra. a) Vista frontal, b) Vista posterior.

Como resultado, surgiu uma banda em torno de 970 MHz com valor de perda de retorno de -23 dB e largura de banda de 83 MHz. A faixa em 2,4 GHz praticamente não teve deslocamento e os resultados apontaram uma tendência de ressonância em 4,8 GHz que, muito provavelmente, é um modo de ordem superior da banda de 900 MHz. A perda de retorno em 2,4 GHz deixou de existir, com valor reduzido para -8,5 dB.

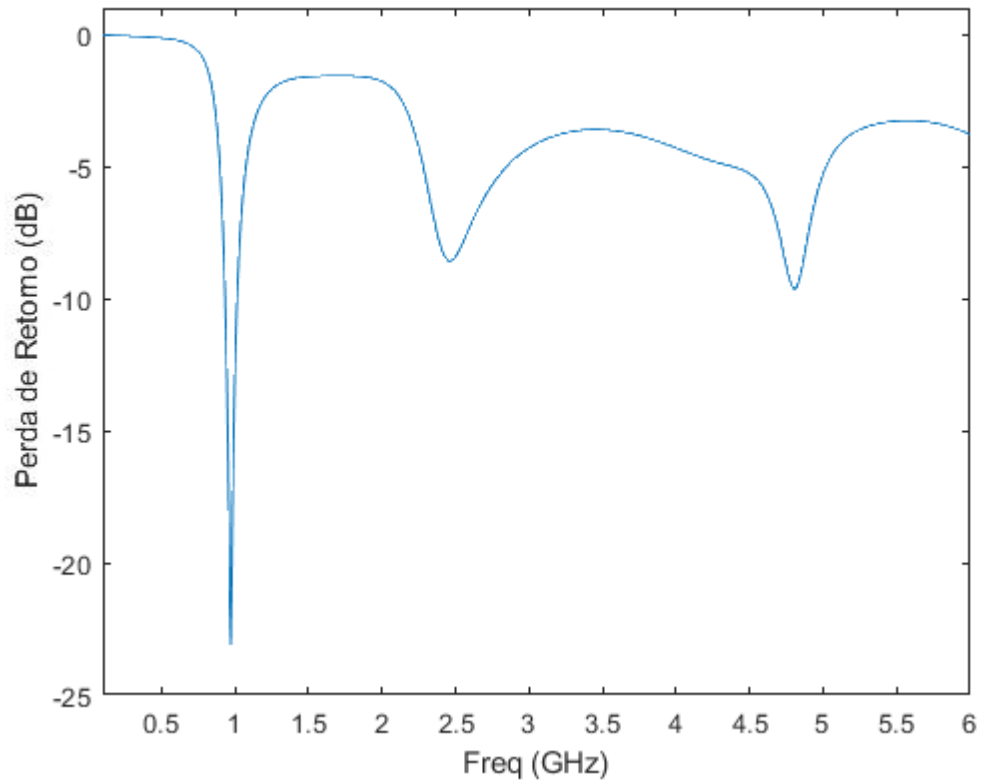


Figura 4.8 – Resultado da perda de retorno simulada para a estrutura com *strip* inserida no *slot* do plano de terra.

Para contornar a perda da banda em 2,4 GHz, resolveu-se alterar as dimensões do monopolo para melhor ajustar o casamento de impedância. Portanto, o comprimento passou a ser de 31,5 mm e a largura de 4 mm, obtidos após uma análise paramétrica e processo de otimização implementado no *software ANSYS HFSS*. A Figura 4.9 apresenta o resultado da perda de retorno da estrutura. Observa-se que, com essa mudança, não houve deslocamento da banda de 2,4 GHz e houve melhoria na perda de retorno, que ficou em -13,5 dB com largura de banda de 124 MHz. A banda de 970 MHz foi deslocada para baixo, ficando centrada em 860 MHz e com banda passante de 55,3 MHz.

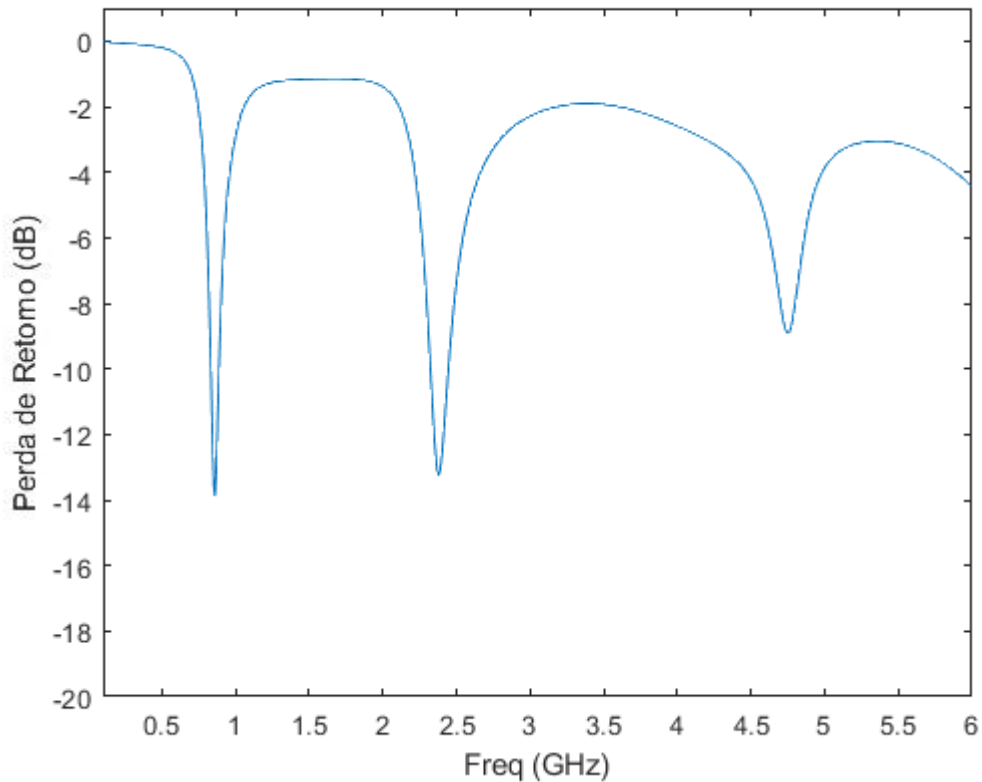


Figura 4.9 – Perda de retorno da estrutura com o monopolo redimensionado.

Alguns ajustes foram feitos na estrutura do plano de terra para obter melhoramento da perda de retorno para ambas as bandas de ressonância. A primeira alteração foi na diminuição do *slot*, que passou a ter um tamanho total de 33x40,5 mm<sup>2</sup>. Com isso, a faixa de 900 MHz não sofreu alteração da frequência central, enquanto a faixa de 2,4 GHz teve um leve deslocamento para cima. Porém, ambas as bandas obtiveram melhores resultados em termos da perda de retorno. A segunda alteração foi a inserção de duas *strips* horizontais nas laterais do *slot*, o que ocasionou leve melhorias nas perdas de retorno e um leve deslocamento da banda de 2,4 GHz para baixo, a qual centralizou-se em 2,43 GHz. A Figura 4.10 apresenta a estrutura após essas alterações. As dimensões do *patch* e do plano de terra são:  $L_f = 31,5$  mm,  $W_f = 4$  mm,  $L_0 = 40,5$  mm,  $L_2 = 2,5$  mm,  $W_2 = 5$  mm.

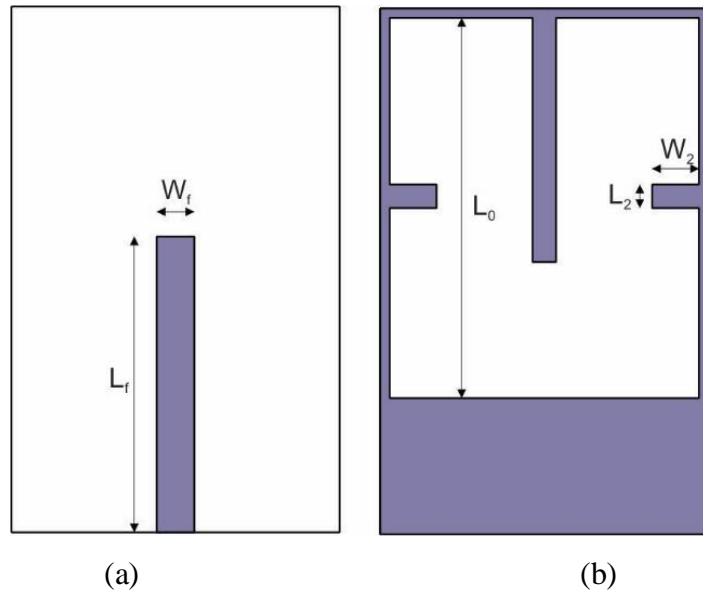


Figura 4.10 – Geometria do plano de terra modificado. a) Vista frontal, b) Vista posterior.

A Figura 4.11 apresenta os resultados para simulação da antena com a configuração descrita na Figura 4.10. De acordo com os resultados observados, a antena apresentou ressonância em duas bandas centradas nas frequências de 895 MHz e 2,43 GHz. Na primeira banda, a antena apresentou uma largura de 69 MHz com uma perda de retorno igual a -19 dB. Na segunda faixa de operação, a banda foi de 159 MHz com perda de retorno igual a -20 dB.

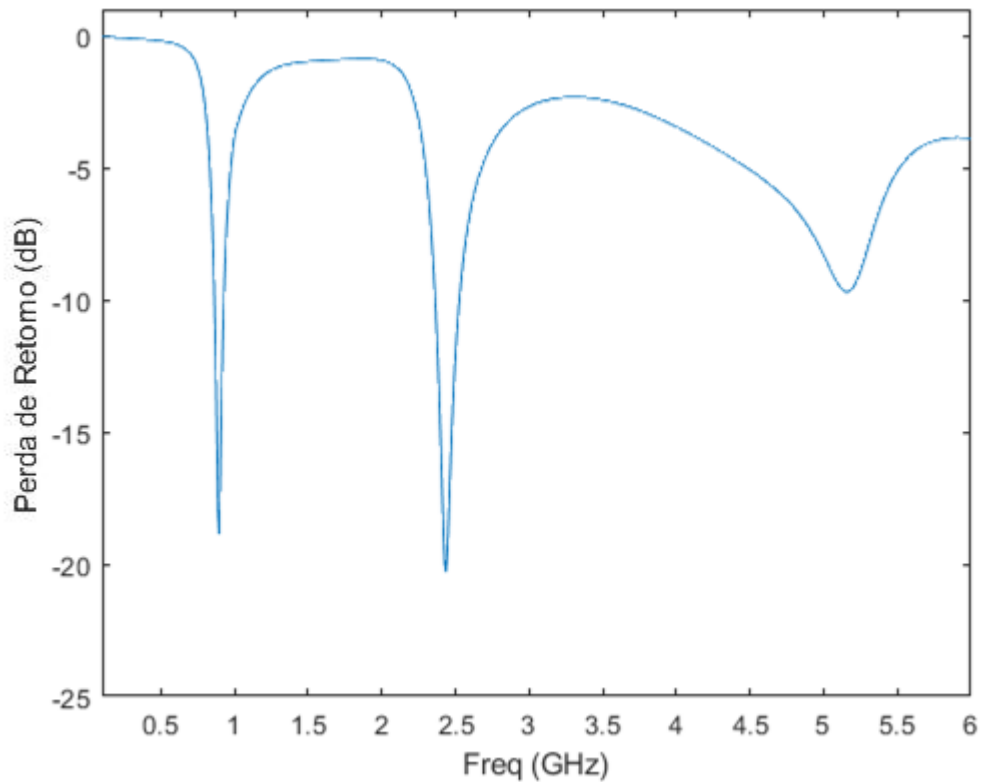


Figura 4.11 – Gráfico da perda de retorno após a diminuição do *slot*.

O passo seguinte foi buscar a terceira banda de ressonância da antena, ou seja, a banda superior do IEEE 802.11ax na faixa de 5 GHz. O projeto seguiu a mesma linha de raciocínio dos passos anteriores, que é inserir um novo elemento na estrutura com dimensões de aproximadamente  $\lambda/4$  da frequência de ressonância desejada. Nesse caso,  $\lambda/4$  para a faixa de 5 GHz é aproximadamente 14 mm.

De maneira a aproveitar as *strips* laterais inseridas no *slot* do plano de terra, decidiu-se adicionar uma nova *strip* em formato “L” de cada lado para estimular a ressonância em 5 GHz. A Figura 4.12 apresenta a nova configuração da antena, que tem as seguintes dimensões:  $W_3 = 6,5$  mm,  $W_4 = 1,5$  mm,  $L_3 = 3,5$  mm.

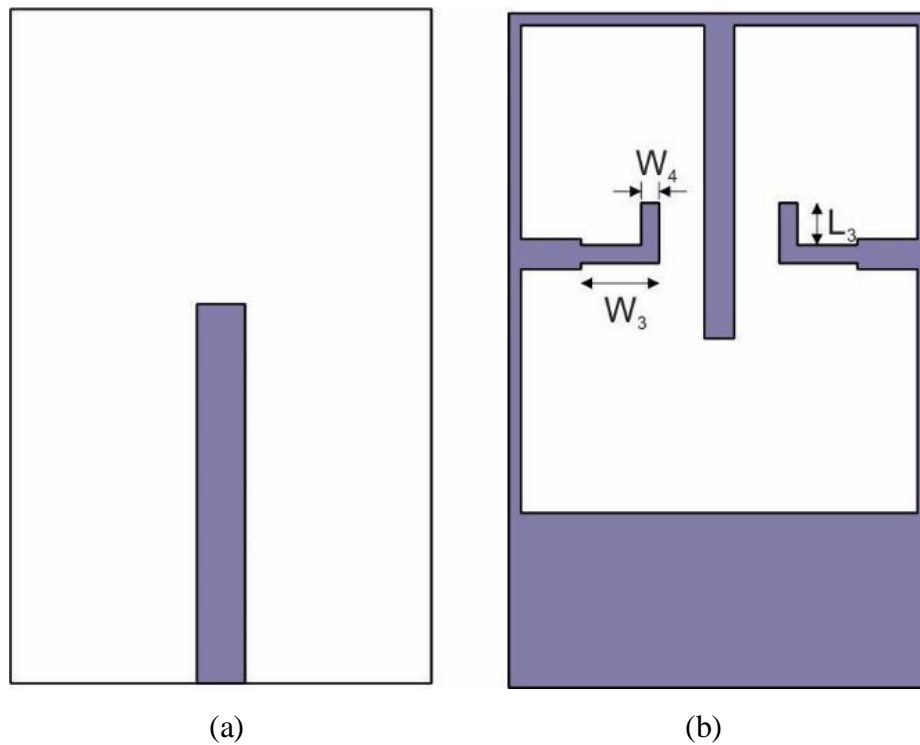


Figura 4.12 – Geometria da estrutura com a inserção de *strips* em formato “L” no plano de terra. a) Vista frontal, b) Vista posterior.

A Figura 4.13 ilustra a perda de retorno simulada para a antena em Figura 4.12. Como pode ser visto no gráfico de perda de retorno, a banda em 900 MHz não sofre alterações, enquanto a faixa de 2,4 GHz teve um deslocamento acentuado para baixo, centralizando-se em 1,95 GHz. Apesar do resultado ser diferente do esperado, esse fato comprova a influência do *slot* no ajuste da frequência de ressonância para a banda de 2,4 GHz.

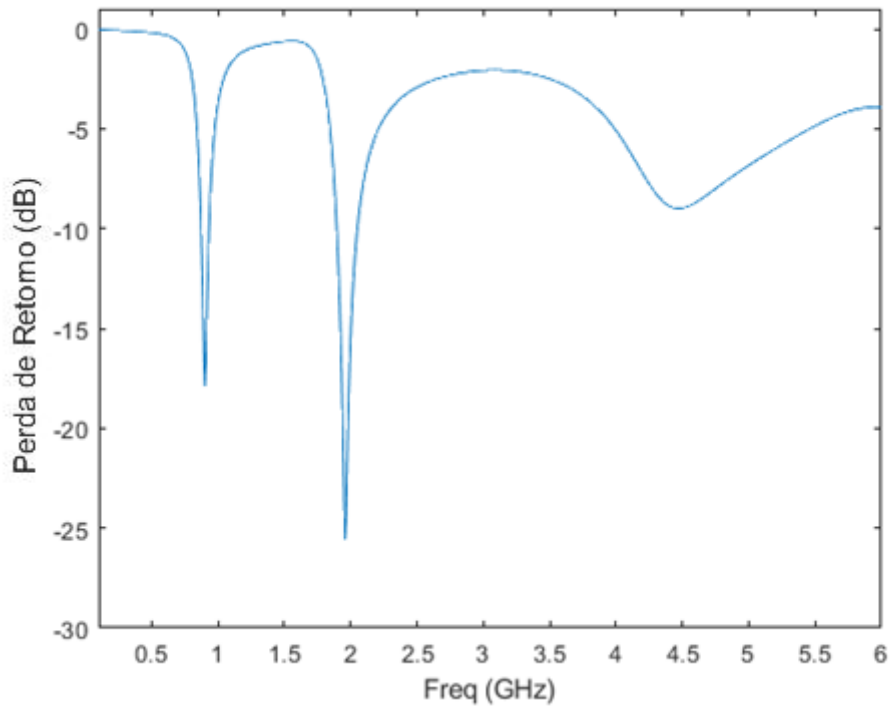


Figura 4.13 – Gráfico da perda de retorno da estrutura apresentada na Figura 4.12.

Uma nova tentativa foi feita através da adição de *strips* em formato “L” no monopolo, conforme apresentado na Figura 4.14. As dimensões são:  $W_3 = 1$  mm,  $W_4 = 6$  mm,  $W_5 = 3$  mm,  $L_3 = 4$  mm,  $L_4 = 1,75$  mm. Com essa configuração, foi possível alcançar o comportando *tri-band* na antena, porém, as bandas de 900 MHz e 5 GHz estão deslocadas para baixo em relação às especificações dos padrões de comunicação sem fio do trabalho proposto, conforme observado na Figura 4.15 que ilustra a perda de retorno dessa configuração.

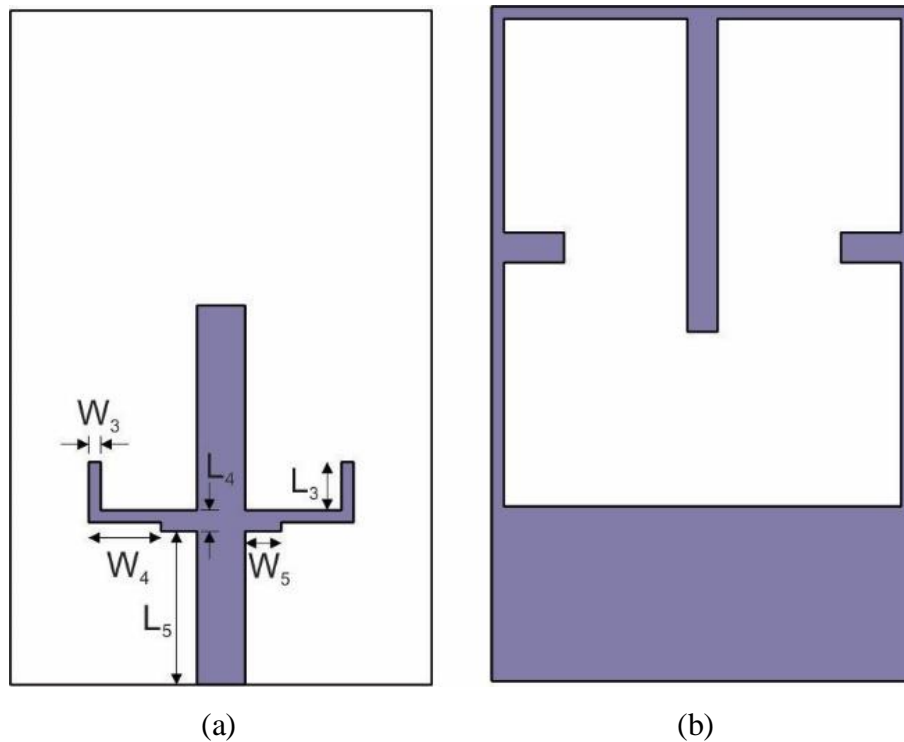


Figura 4.14 – Estrutura com a adição de *strips* em formato “L” no monopolo. a) Vista frontal, b) Vista posterior.

A banda inferior ficou centrada em 770 MHz com perda de retorno de apenas -10dB. A frequência intermediária centrou-se em 2,44 GHz com 277 MHz de largura de banda. Ao mesmo tempo que a banda superior teve bom resultado em perda de retorno, porém, com um pouco de deslocamento para baixo em relação a exigência estabelecida pelo padrão, estando centrada em 4,7 GHz.

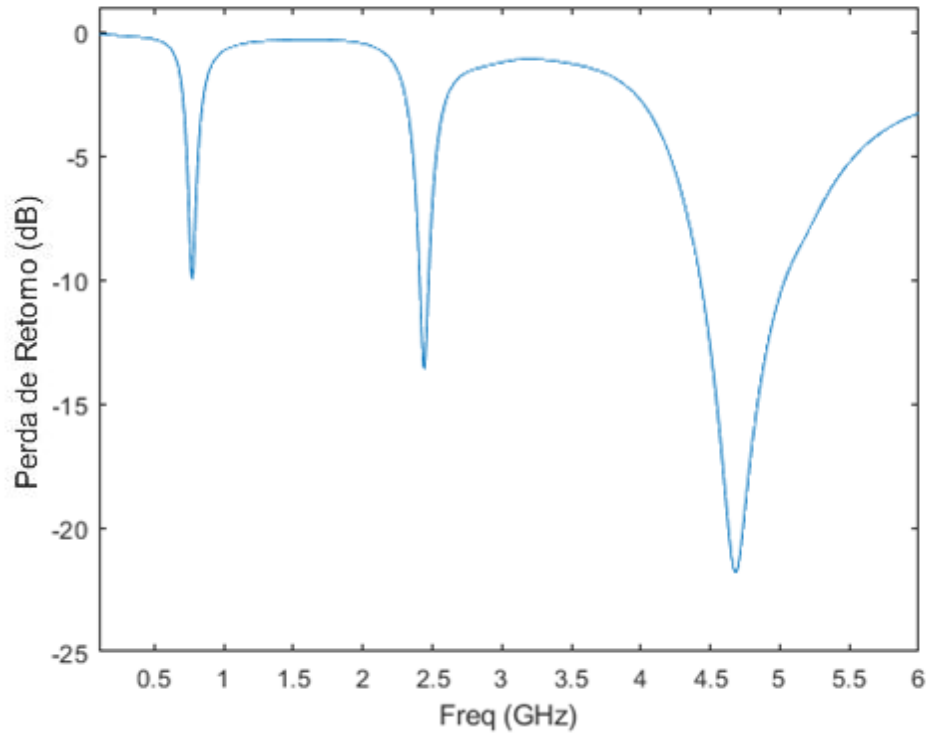


Figura 4.15 – Gráfico da perda de retorno da estrutura apresentada na Figura 4.14.

Para ajustar as frequências de ressonâncias de modo a atenderem os sistemas propostos, foram realizadas algumas modificações sucintas no monopolo e na *strip* vertical do plano de terra. A estrutura *tri-band* após as modificações realizadas, assim como o seu gráfico da perda de retorno estão ilustrados na Figura 4.16 e na Figura 4.17, respectivamente. As dimensões da estrutura na figura 4.16 são:  $L_{f1} = 3 \text{ mm}$ ,  $W_{f1} = 29 \text{ mm}$ ,  $L_1 = 25 \text{ mm}$ .

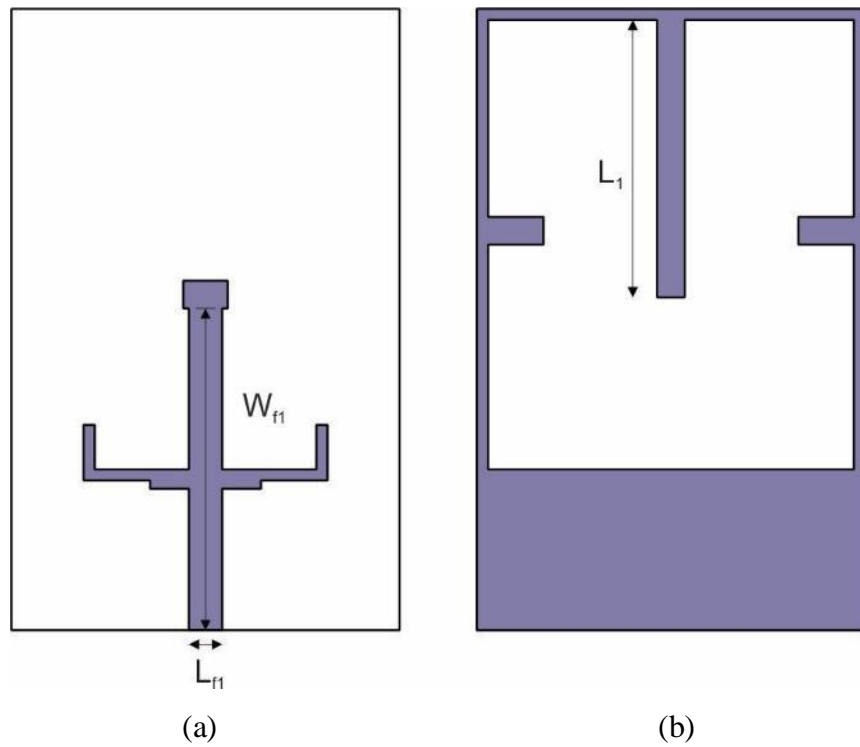


Figura 4.16 – Geometria da estrutura com suas dimensões finais para operação *tri-band*.

a) Vista frontal, b) Vista posterior.

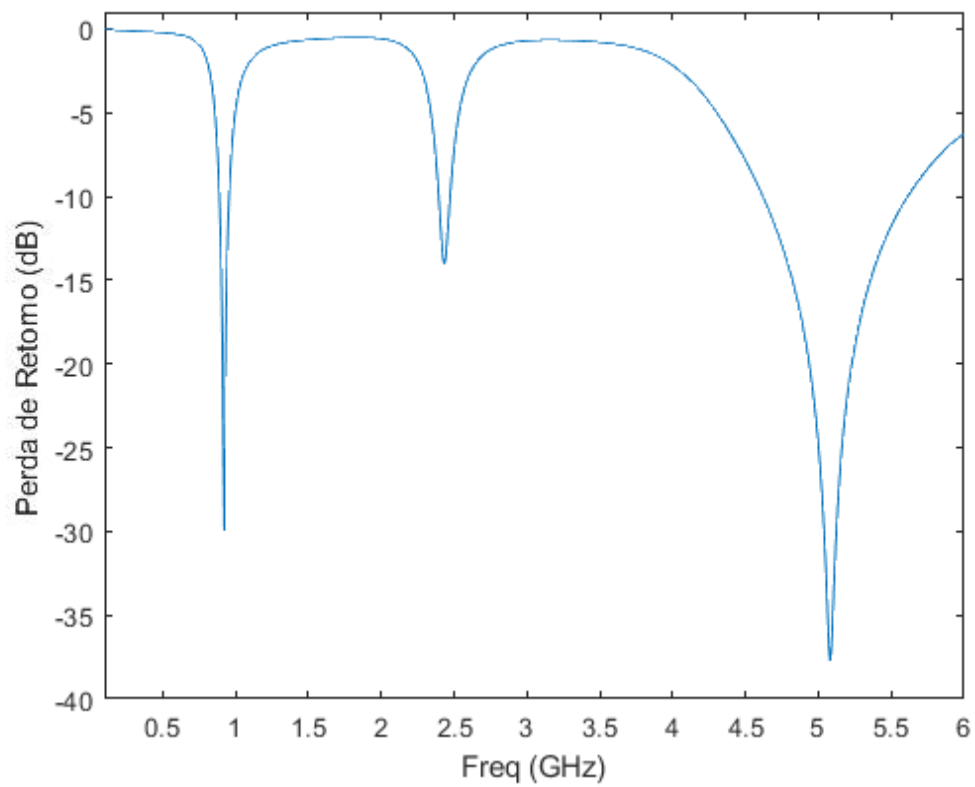


Figura 4.17 – Gráfico da perda de retorno da estrutura apresentada na Figura 4.16.

Como pode ser observado na Figura 4.17, a banda inferior está centrada em 920 MHz, com perda de retorno de -30 dB e largura de banda de 69 MHz. A banda intermediária, tem frequência central de 2,45 GHz, 83 MHz de banda passante e -14 dB de perda de retorno. A faixa de frequência superior está centrada em 5,08 GHz com 1 GHz de largura de banda e -38 dB de perda de retorno. Dessa maneira, obteve-se resultado satisfatório para a atividade do projeto da estrutura multibanda.

Após a obtenção de um bom resultado na simulação realizada no *ANSYS HFSS*, foi construído o protótipo e feita a sua medição em laboratório por meio do analisador de rede do modelo E5071C da *Agilent Technologies*. O protótipo construído é apresentado na figura 4.18.

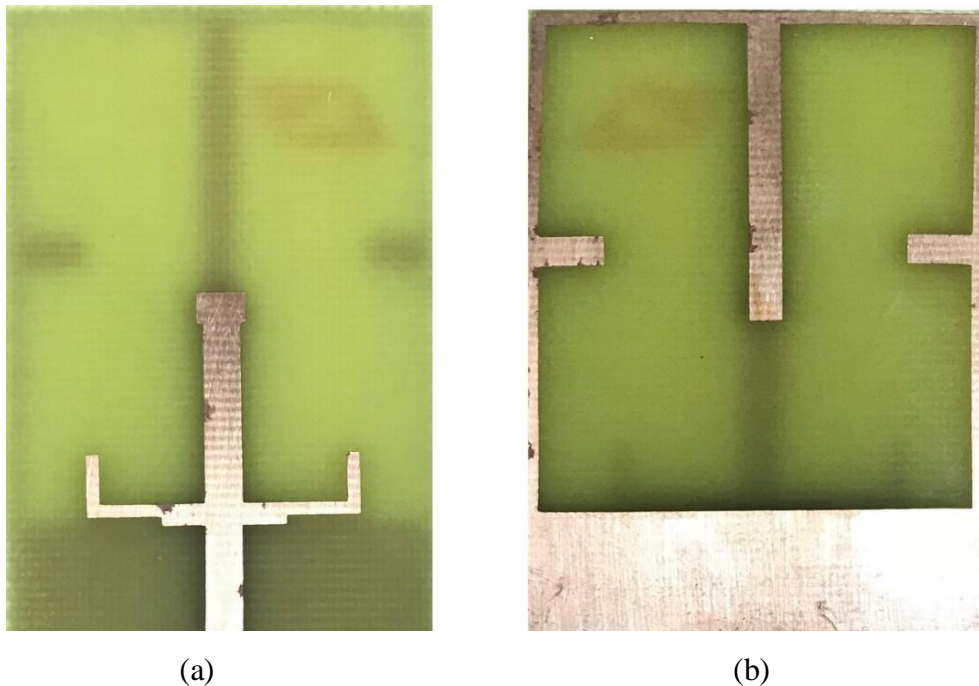


Figura 4.18 – Protótipo construído. a) Vista frontal, b) Vista posterior.

A Figura 4.19 apresenta os resultados simulados e medidos para a estrutura proposta. De acordo com as curvas, a antena apresenta uma operação em três bandas distintas para a faixa de frequência considerada nesta análise. A primeira faixa de operação apresenta uma frequência de ressonância simulada igual 920 MHz, com uma largura de banda igual a 69 MHz e uma perda de retorno de -30 dB, na frequência de ressonância. Os valores medidos indicaram frequência de ressonância igual 979 MHz e largura de banda de 75 MHz.

Na segunda faixa de operação, a antena apresentou uma previsão teórica por meio das simulações uma ressonância centrada em 2,45 GHz com uma banda passante de 83 MHz, para

uma referência de -10dB. Os valores medidos indicaram que a ressonância ocorre em 2,42 GHz e a largura de banda foi de 93 MHz.

Na terceira banda de operação, a antenna apresentou uma frequência de ressonância simulada igual a 5,08 GHz com largura de banda de 1 GHz. Nos resultados medidos indicaram um pequeno desvio de 3,5% em relação a frequência de ressonância. Na caracterização experimental, a antenna apresentou ressonância em 4,90 GHz com uma largura de banda de 77 MHz.

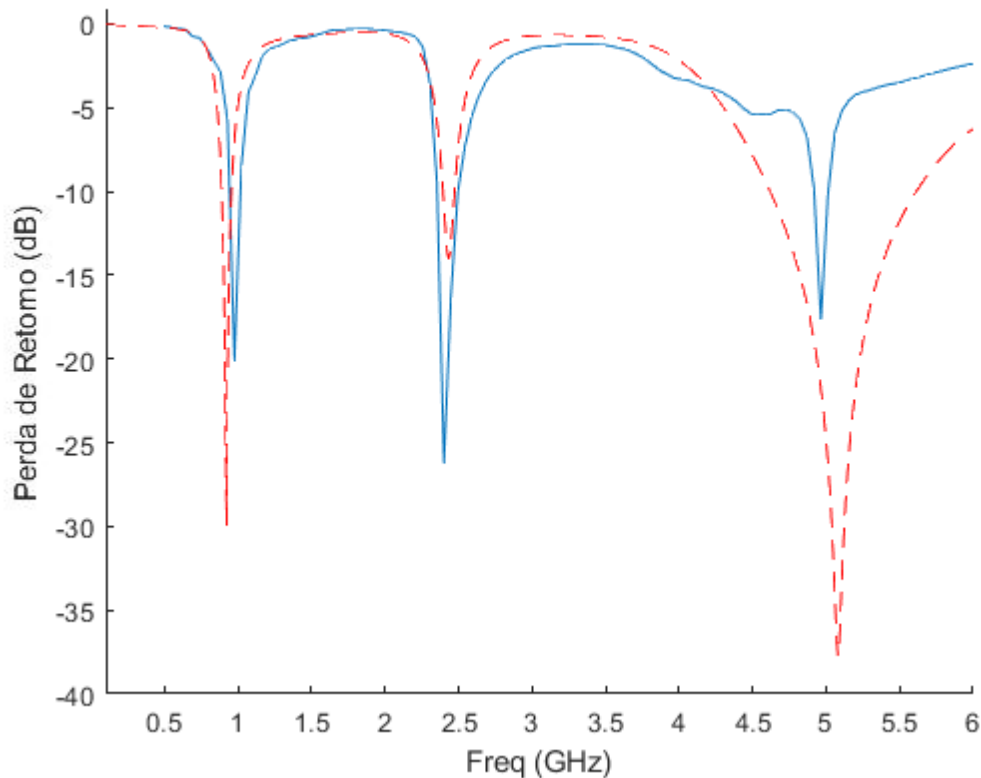


Figura 4.19 – Gráfico da perda de retorno simulado (tracejado) e medido (linear).

Para fins de comparação, as Tabelas 4.1, 4.2 e 4.3 apresentam os resultados simulados e medidos para resposta em frequência da antenna apresentada na Figura 4.18, considerando as especificações estabelecidas pelos padrões IEEE 802.11ah e 802.11ax. Na tabela estão apresentados valores simulados e medidos para frequência de ressonância ( $f_r$ ), largura de banda (BW) e perda de retorno (*Return Loss* – *RL*) na frequência de ressonância (considera-se ressonância quando a perda de retorno apresenta valores abaixo de -10 dB, por padrão). São calculados ainda os desvios  $\Delta_1 = |f_{\text{padrão}} - f_{\text{simulada}}|/f_{\text{padrão}}$  e  $\Delta_2 = |f_{\text{padrão}} - f_{\text{medida}}|/f_{\text{padrão}}$  que correspondem respectivamente, ao desvio percentual entre valor simulado em relação ao valor

especificado pelo padrão e o desvio percentual entre o resultado medido e o valor especificado pelo padrão correspondente.

Tabela 4.1 – Resposta em frequência da antena construída para o padrão IEEE 802.11ah

Parâmetro	Especificação do Padrão	Valor Simulado	Valor Medido	$\Delta_1$	$\Delta_2$
$f_r$ (MHz)	916	920	979	0,44%	6,87%
BW(MHz)	26	69	75	165,4%	188,4%
$RL(f_r)$ (dB)	-	-30	-20	-	-

Fonte: Autor.

Tabela 4.2 – Resposta em frequência da antena construída para o padrão IEEE 802.11ax (banda inferior)

Parâmetro	Especificação do Padrão	Valor Simulado	Valor Medido	$\Delta_1$	$\Delta_2$
$f_r$ (MHz)	2440	2450	2420	0,41%	0,82%
BW(MHz)	84	83	93	1,19%	10,84%
$RL(f_r)$ (dB)	-	-14	-26	-	-

Fonte: Autor.

Tabela 4.3 – Resposta em frequência da antena construída para o padrão IEEE 802.11ax (banda superior)

Parâmetro	Especificação do Padrão	Valor Simulado	Valor Medido	$\Delta_1$	$\Delta_2$
$f_r$ (MHz)	5200	5080	4900	2,31%	5,77%
BW(MHz)	665	1000	77	50,37%	88,42%
$RL(f_r)$ (dB)	-	-38	-17	-	-

Fonte: Autor.

Diante dos resultados apresentados na tabela, percebe-se que para a primeira faixa de frequência, os valores simulados atendem as especificações estabelecidas para o padrão IEEE 802.11ah, porém, nos valores medidos houve um pequeno desvio que ocasionou na saída da banda especificada. Possivelmente, um dos motivos para esse desvio é a pequena flutuação no valor da permissividade elétrica relativa que o substrato pode apresentar, ocasionando esse sucinto desvio. Para a faixa de frequência intermediária, tanto os valores simulados quando os valores medidos atendem as especificações do padrão IEEE 802.11ax. No que concerne a faixa de frequência superior, os resultados simulados apresentaram uma forte correspondência com relação ao estabelecido no sistema.

Os desvios ( $\Delta_1$  e  $\Delta_2$ ) apresentaram valores pequenos para a frequência de ressonância, indicando boa concordância dos resultados obtidos em relação aos especificados nos padrões. Para a largura de banda esses valores foram mais elevados devido à ressonância abranger uma faixa maior do que as especificadas pelos sistemas, não se tratando de um problema, pois a banda continua englobada pela resposta da antena, atendendo completamente a exigência da especificação. Com exceção da banda medida em 4,90 GHz que teve sua faixa reduzida em relação aos valores especificados e simulados. Para os resultados experimentais foi observado um deslocamento de 180 MHz para a frequência de ressonância estabelecida pelo padrão em relação aos valores simulados. Em face dos resultados observados, verifica-se uma boa concordância entre as medições e simulações, porém para a banda superior o resultado medido não compreendeu totalmente a faixa de 5 GHz, especificada para o padrão 802.11ax. Isto deve-se ao fato de que o processo de fabricação realizado não apresenta grande precisão.

As Figuras de 4.20 a 4.22 apresentam os diagramas de radiação simulados para as três faixas de frequências observadas.

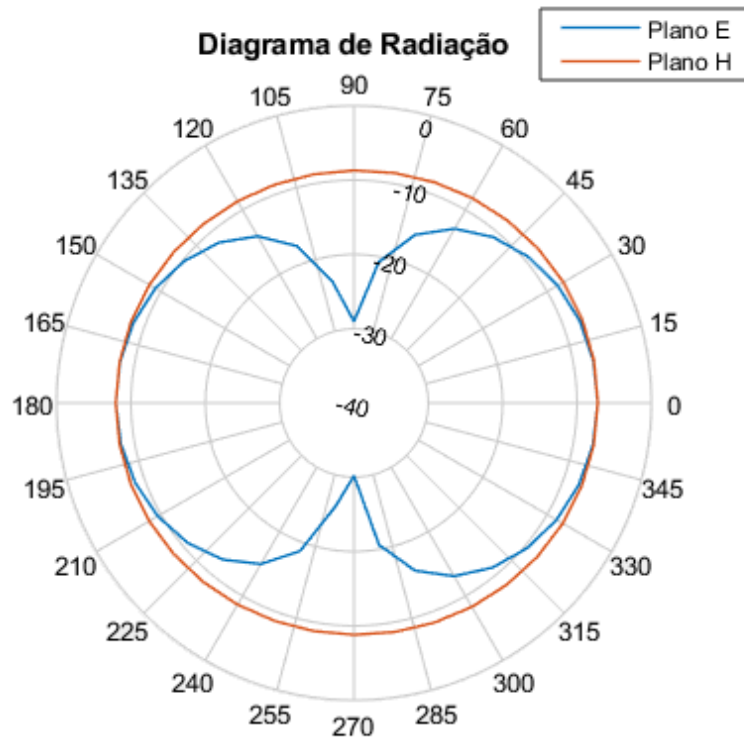


Figura 4.20 – Diagrama de radiação para a banda de 900 MHz.

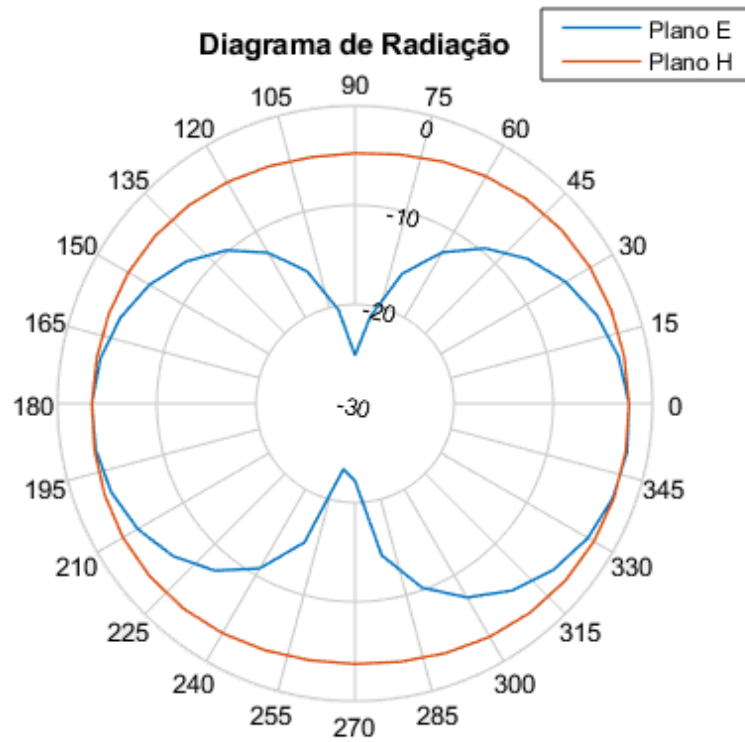


Figura 4.21 - Diagrama de radiação para a banda de 2,4 GHz.

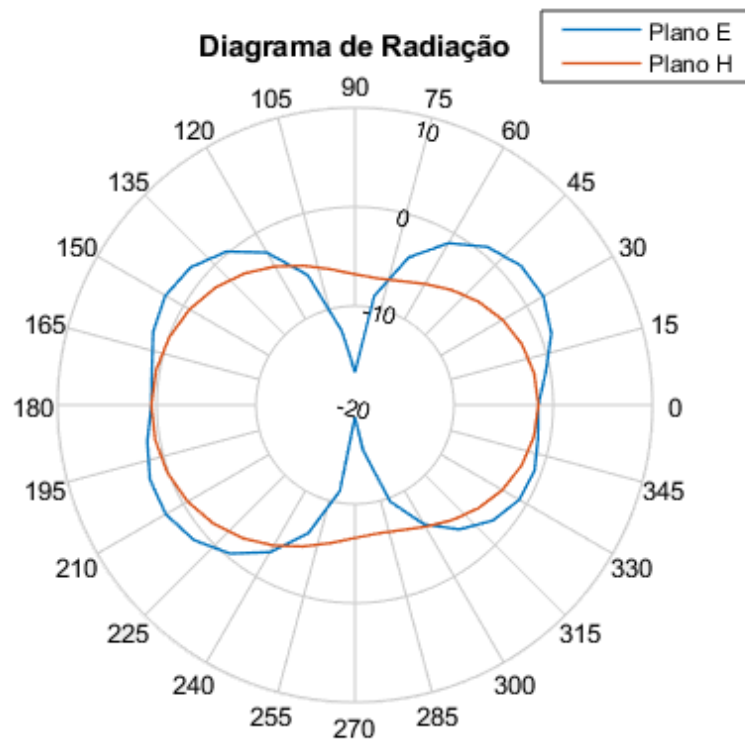


Figura 4.22 - Diagrama de radiação para a banda de 5 GHz.

De acordo com as figuras do diagrama de radiação, observa-se que a estrutura tem uma maior largura de feixe de meia potência para as bandas de 900 e 2400 MHz, enquanto a banda de 5 GHz tem uma largura menor, sendo mais diretiva. Verifica-se, também, que o diagrama de radiação se comporta semelhantemente a um dipolo, apresentando comportamento quase omnidirecional da estrutura em todas as faixas de operação, obtendo maior ganho na banda de ressonância superior. Esse tipo de diagrama de radiação é apropriado para os serviços propostos neste trabalho devido ao fato de que ele irradia, praticamente, em todas as direções, sendo adequada ao uso de dispositivos móveis devido a versatilidade e manuseio deles.

## 4.2 Antena Reconfigurável para os Sistemas IEEE 802.11ah, IEEE 802.11ax e CBRS

Neste tópico, será apresentada uma variação da antenna anterior para atender ao sistema CBRS em 3,5 GHz e, posteriormente, será aplicada a reconfiguração por meio de diodos PIN.

Tomando como referência a antenna apresentada anteriormente, resolveu-se realizar uma modificação em seu projeto para que a resposta em frequência da estrutura atendesse a faixa de 3,5 GHz. A proposta foi deslocar a frequência superior, que estava em 5 GHz, para a faixa de 3,5 GHz. Como o elemento responsável por essa ressonância são as *strips* em “L” colocadas no monopolo, resolveu-se modificar suas dimensões para que atendesse os requisitos do sistema proposto. Mantendo o procedimento utilizado anteriormente para alcançar as frequências desejadas, foi utilizado o tamanho referente a um quarto do comprimento de onda para a frequência de 3,5 GHz, ou seja, aproximadamente 20 mm. Somando o comprimento total do elemento em “L”, temos que  $W_4 + W_5 + L_3 = 6 + 3 + 9,5 = 18,5$  mm. A Figura 4.23 apresenta a nova dimensão desse elemento e a Figura 4.24 ilustra o gráfico simulado da perda de retorno da nova configuração.

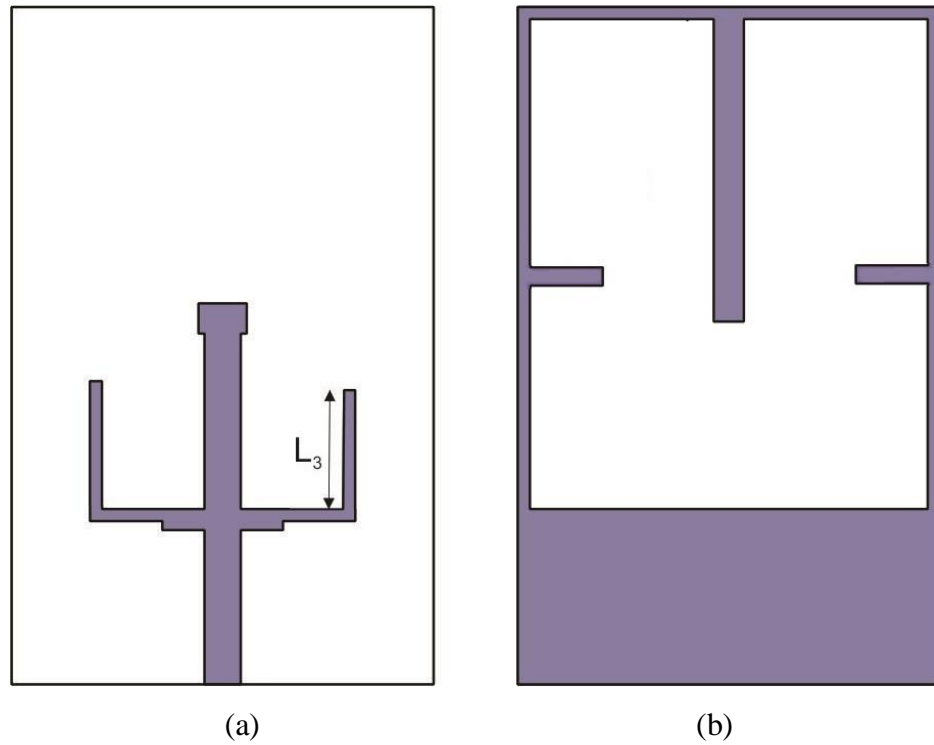


Figura 4.23 – Modificação da dimensão da *strip* em “L”. Novo tamanho:  $L_3 = 9,5$  mm.

a) Vista frontal, b) Vista posterior.

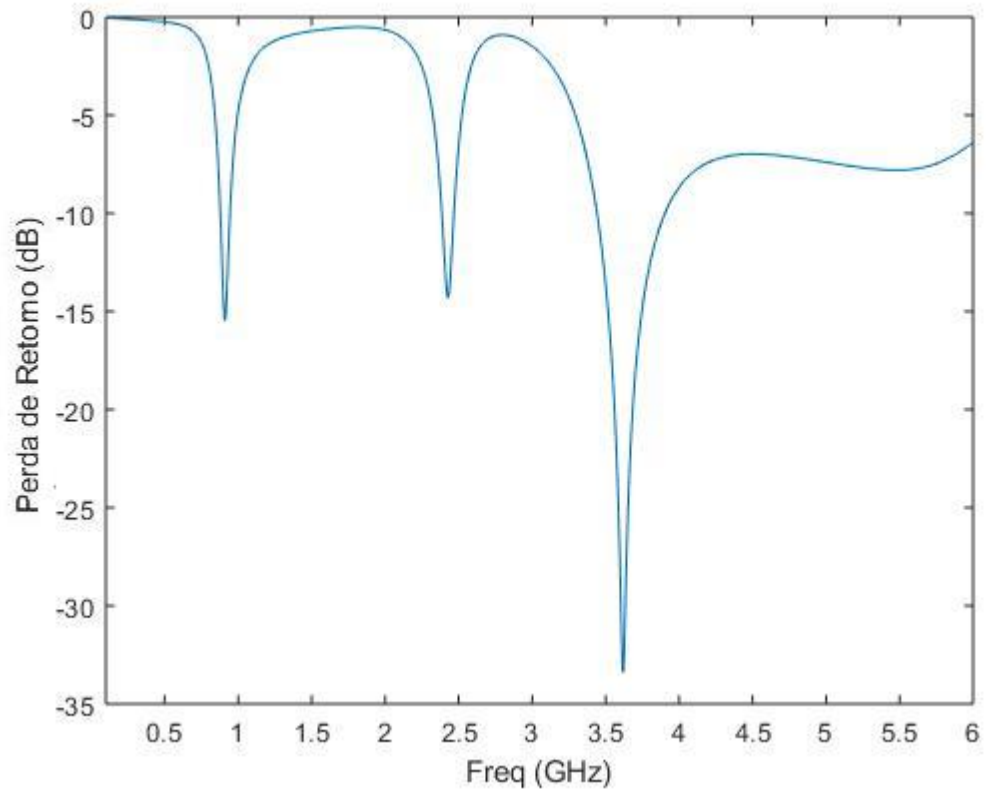


Figura 4.24 – Gráfico simulado da perda de retorno da antena com modificação na dimensão  $L_3$ .

Com esse resultado, verifica-se que as duas bandas inferiores, em 900 MHz e 2,4 GHz, permaneceram inalteradas, enquanto ocorreu o deslocamento da banda de 5 GHz para 3,6 GHz (3,45 a 3,90 GHz), como esperado. Sendo assim, foi alcançado o objetivo de atender os três sistemas de comunicações sem fio propostos neste trabalho.

O próximo passo foi aplicar a reconfiguração à antena por meio de diodos PIN. Para isso, foram escolhidos três pontos considerados críticos para colocação dos diodos para que se verificasse o comportamento multibanda da estrutura. O diodo utilizado foi o BAR64-05 da *Infineon* e o *datasheet* pode ser observado em [35]. Abaixo está descrita suas características e a Figura 4.25 apresenta o diodo.

- Intervalo de operação: 1 MHz a 6 GHz;
- Máxima corrente direta: 100 mA;
- Máxima tensão reversa: 150 V;
- Máxima capacitância: 0,35 pF;
- Resistência: 1,35  $\Omega$  para 100 mA;
- Tensão direta: 1,1 V para 100 mA.

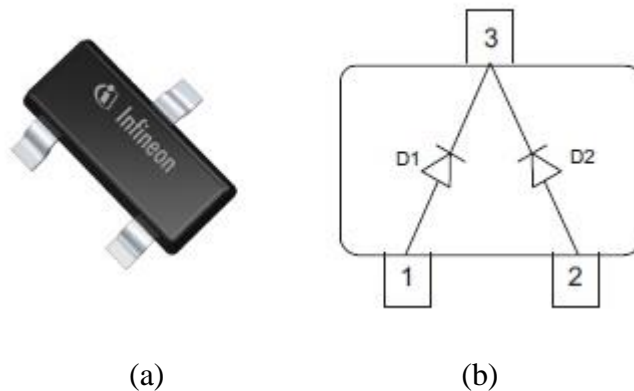


Figura 4.25 – Diodo BAR64-05. (a) Diodo utilizado na estrutura e (b) sua representação gráfica.

Esse diodo foi escolhido por atender as necessidades de projeto. Como pode ser visto na representação gráfica, Figura 4.25 (b), há dois diodos em um mesmo encapsulamento. Porém, no projeto realizado foi utilizado apenas um diodo (D1) de cada encapsulamento, sendo o segundo diodo (D2) inutilizado. A escolha do dispositivo com dois diodos em cada cápsula foi feita devido as opções de mercado disponível no momento da compra desses objetos.

A Figura 4.26 apresenta a posição dos diodos na antenna.

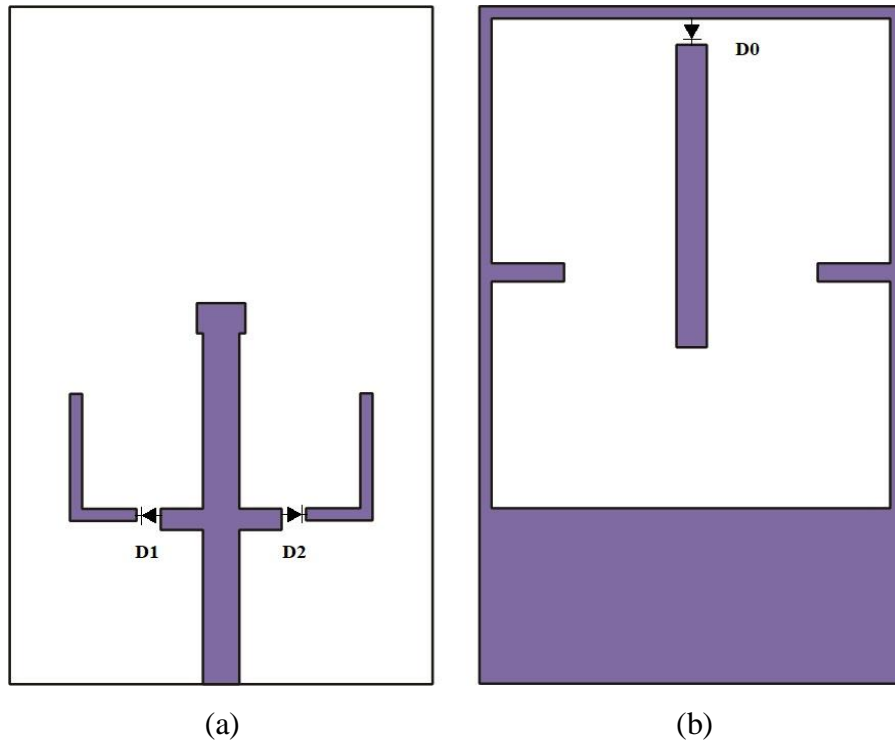


Figura 4.26 – Posição dos diodos na antenna. a) Vista frontal, b) Vista posterior.

Esses três diodos proporcionarão oito combinações diferentes. Dessa maneira, a Tabela 4.4 apresenta os resultados das simulações realizadas levando em consideração a reconfiguração da antenna, em que o valor “0” representa o estado “OFF” e o valor “1” representa o estado “ON”.

Tabela 4.4 – Resultados simulados das bandas de frequências alcançadas na reconfiguração.

CONFIG	D <sub>2</sub> D <sub>1</sub> D <sub>0</sub>	DESCRIÇÃO
1	000	Banda 1: <b>1,30-1,49</b> GHz
2	001	Banda 1: <b>894-970</b> MHz / Banda 2: <b>2,43-2,60</b> GHz
3	010	Banda 1: <b>1,38-1,51</b> GHz / Banda 2: <b>3,11-3,43</b> GHz
4	011	Banda 1: <b>901-977</b> MHz / Banda 2: <b>2,40-2,51</b> GHz / Banda 3: <b>3,10-3,40</b> GHz
5	100	Banda 1: <b>1,38-1,50</b> GHz / Banda 2: <b>3,07-3,38</b> GHz
6	101	Banda 1: <b>892-963</b> MHz / Banda 2: <b>2,43-2,52</b> GHz / Banda 3: <b>3,10-3,37</b> GHz
7	110	Banda 1: <b>3,47-3,95</b> GHz
8	111	Banda 1: <b>880-950</b> MHz / Banda 2: <b>2,39-2,47</b> GHz / Banda 3: <b>3,44-3,90</b> GHz

Fonte: Autor.

Conforme os resultados apresentados, verifica-se que em três das oito combinações apresentaram resultados que englobam os requisitos de ressonância para os sistemas propostos. São eles, a configuração 2, 7 e 8. A configuração 2 abrange a banda do *Wi-Fi HaLow* e a banda inferior do *Wi-Fi 6*. A configuração 7 opera na banda do CBRS, enquanto na configuração 8 tem-se o comportamento *tri-band*, abrangendo os três sistemas. A Figura 4.27 ilustra a perda de retorno simulada dessas três configurações.

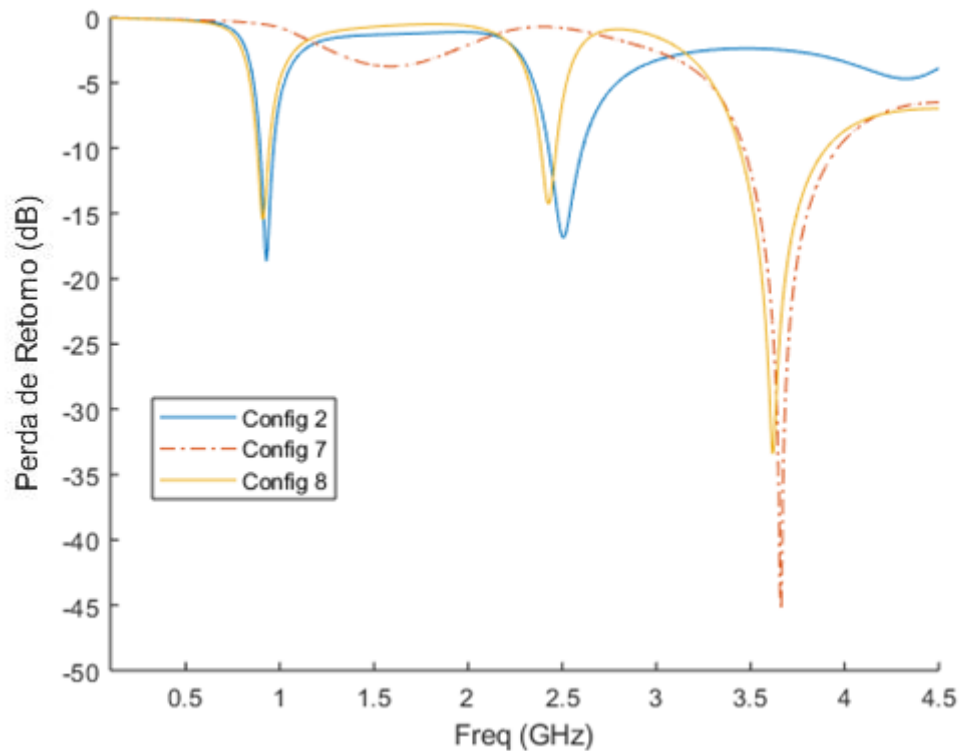


Figura 4.27 – Perda de retorno simulada das configurações 2, 7 e 8.

A partir dos resultados obtidos, foi realizada a prototipagem da estrutura. A Figura 4.28 apresenta a antena construída em substrato de FR-4 e com diodos PIN. Esse tipo de diodo opera de maneira satisfatória dentro do intervalo de frequência necessário para atuação dos sistemas de comunicações sem fio em questão. Após a prototipagem, utilizou-se o analisador de redes para realizar a medição da resposta da estrutura. A Figura 4.29 apresenta os resultados obtidos.

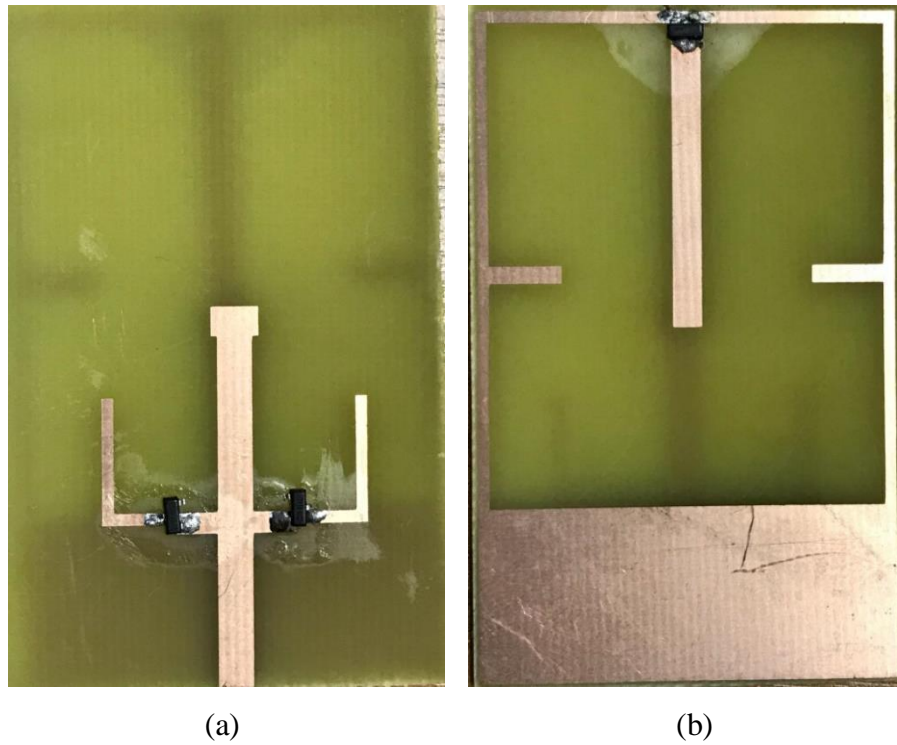


Figura 4.28 – Protótipo construído. a) Vista frontal, b) Vista posterior.

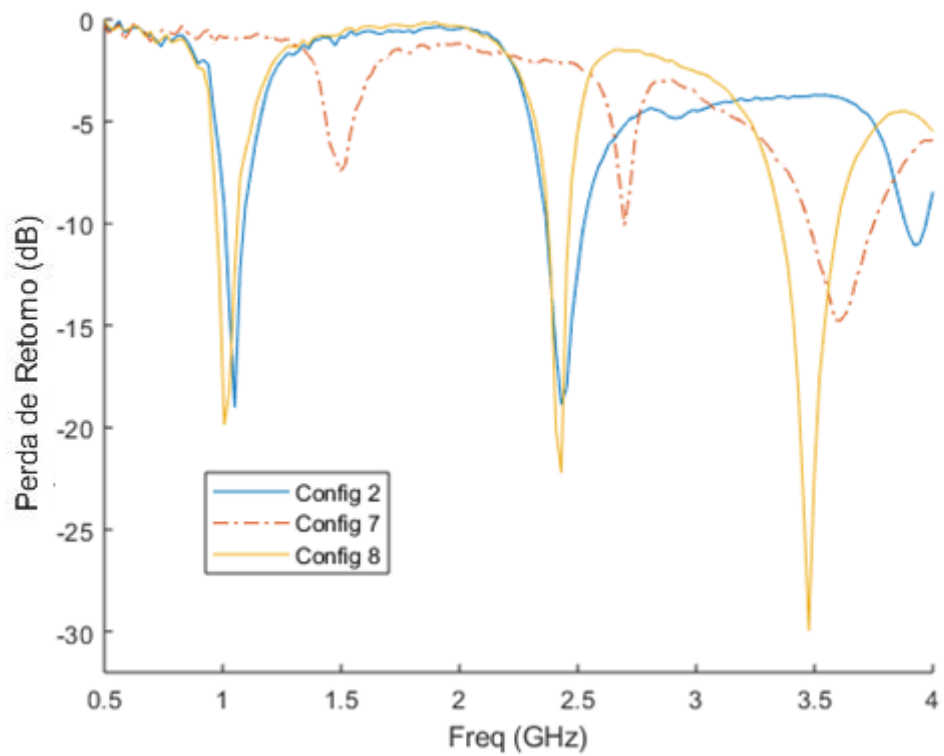


Figura 4.29 – Resultado da medição para as configurações 2, 7 e 8.

De acordo com os resultados medidos, verifica-se que a banda do *Wi-Fi HaLow* apresentou deslocamento para cima em relação aos valores simulados, estando localizada em

torno de 1 GHz. Observa-se, também, que tanto para a configuração 2 quanto para a configuração 8, o resultado apresentado foi similar nessa mesma região de frequência. A mesma similaridade pode ser vista na região em torno da banda inferior do *Wi-Fi 6*, em 2,45 GHz. Para a região em torno do sistema CBRS, em 3,5 GHz, observa-se que a configuração 7 e 8 apresentaram resultados aproximados. Na configuração 7, a largura de banda é de 3,47 a 3,75 GHz. Enquanto a largura da banda na configuração 8 é de 3,37 a 3,60 GHz. Percebe-se um deslocamento para baixo da faixa do CBRS na configuração 8, que conseqüentemente não atende os requisitos do sistema por completo. Esses sutis deslocamentos nas frequências de 900 MHz e 3,5 GHz podem ser atribuídos a influência que os elementos curto-circuitados originam na resposta da antenna. As Tabelas 4.5, 4.6 e 4.7 apresentam os resultados simulados e medidos para resposta em frequência da antenna apresentada na Figura 4.28, operando na configuração 8, considerando as especificações estabelecidas pelos padrões IEEE 802.11ah, 802.11ax e CBRS.

Tabela 4.5 – Resposta em frequência da antenna construída para o padrão IEEE 802.11ah

Parâmetro	Especificação do Padrão	Valor Simulado	Valor Medido	$\Delta_1$	$\Delta_2$
$f_r$ (MHz)	916	908	1000	0,87%	9,17%
BW(MHz)	26	69	87	165,4%	234,6%
$RL(f_r)$ (dB)	-	-15,5	-20	-	-

Fonte: Autor.

Tabela 4.6 – Resposta em frequência da antenna construída para o padrão IEEE 802.11ax (banda inferior)

Parâmetro	Especificação do Padrão	Valor Simulado	Valor Medido	$\Delta_1$	$\Delta_2$
$f_r$ (MHz)	2440	2430	2450	0,41 %	0,41%
BW(MHz)	84	83	100	1,19%	19,04%
$RL(f_r)$ (dB)	-	-14,3	-22	-	-

Fonte: Autor.

Tabela 4.7 – Resposta em frequência da antenna construída para o padrão CBRS

Parâmetro	Especificação do Padrão	Valor Simulado	Valor Medido	$\Delta_1$	$\Delta_2$
$f_r$ (MHz)	3625	3620	3490	0,14%	3,72%
BW(MHz)	150	456	250	204%	66,67%
$RL(f_r)$ (dB)	-	-33,4	-30	-	-

Fonte: Autor.

De acordo com os resultados apresentados nas tabelas, verifica-se que as frequências de ressonâncias nas três bandas tiveram desvios ( $\Delta_1$ ) menores que 1% em relação aos valores simulados e pequenos desvios ( $\Delta_2$ ) para os resultados medidos, sendo o maior deles de 9,17% na banda do sistema IEEE 802.11ah. Apesar dos elevados valores para os desvios da largura de banda, esse fato não corresponde a um problema, uma vez que as bandas fornecidas pela estrutura englobam as bandas requisitadas pelos sistemas. Sendo assim, verifica-se que os resultados medidos foram concordantes com os resultados simulados, no qual corrobora o estudo realizado

As figuras 4.30, 4.31 e 4.32 apresentam os diagramas de radiação simulados para as frequências de 900 MHz, 2,4 GHz e 3,5 GHz da antenna na configuração 8.

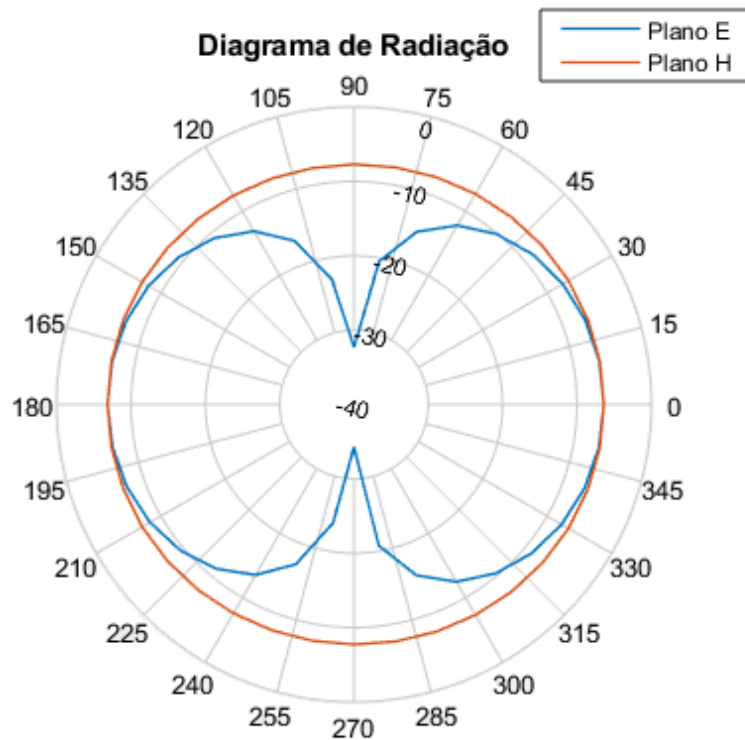


Figura 4.30 – Diagrama de radiação para a banda de 900 MHz.

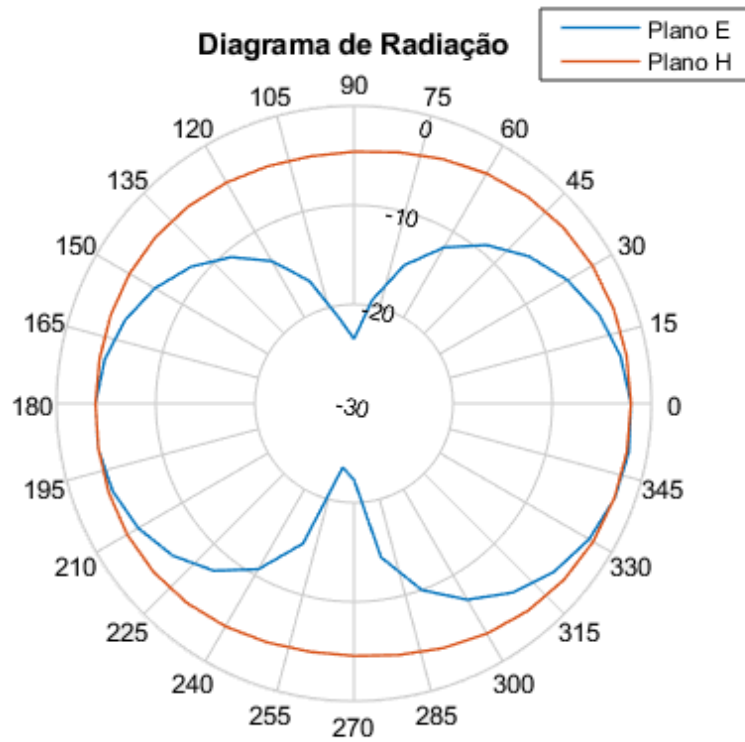


Figura 4.31 – Diagrama de radiação para a banda de 2,4 GHz.

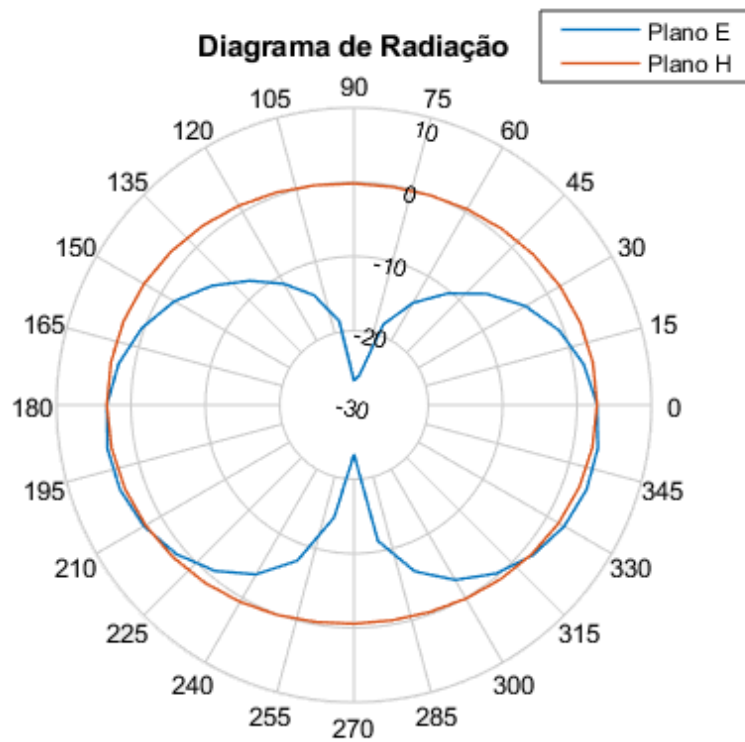


Figura 4.32 – Diagrama de radiação para a banda de 3,5 GHz.

De acordo com as figuras do diagrama de radiação, observa-se que a estrutura ilustra praticamente os mesmos resultados da antena apresentada anteriormente. Ou seja, apresenta maior largura de feixe de meia potência para as bandas de 900 e 2400 MHz, enquanto a banda de 3500 MHz tem uma largura menor, sendo mais diretiva. Verifica-se, também, que o diagrama de radiação se comporta semelhantemente a um dipolo, apresentando comportamento quase omnidirecional da estrutura em todas as faixas de operação. Verifica-se que os ganhos gerais obtidos nas duas faixas de frequência inferiores são baixos, em torno de -6,5 dB para a faixa dos 900 MHz e -2,5 dB para a faixa de 2,45 GHz. O ganho geral para a faixa de 3,5 GHz é de 3,8 dB, sendo a faixa com maior ganho da estrutura.

---

## Capítulo 5 - Conclusão

---

Neste trabalho, foi apresentado o projeto e desenvolvimento de duas antenas planares de microfita de baixo custo e fácil fabricação para aplicações multibanda nas redes 5G. Foi apresentado um breve capítulo sobre os padrões de comunicações sem fio IEEE 802.11ah, IEEE 802.11ax e CBRS, nos quais, definiram os requisitos de frequência de ressonância e largura de banda para o projeto. Foi realizado um estado da arte, apresentando os principais trabalhos que serviram de base para o desenvolvimento deste, em especial, a metodologia utilizada para alcançar resultados de multibandas por meio da utilização de *strips* e *slots*. Além disso, foi realizada a reconfiguração eletrônica da estrutura mediante a utilização de diodos PIN.

As antenas de microfita foram projetadas, simuladas e medidas. Durante o processo de desenvolvimento das estruturas, foram realizados ajustes e modificações para adequação da resposta de maneira a atender os requisitos dos sistemas propostos. Verificou-se que a *strip* colocada no *slot* do plano de terra foi responsável pela ressonância na banda inferior em 900 MHz. Foi observado, também, que por meio da variação do tamanho das *strips* em formato “L” localizadas no monopolo, é possível variar a frequência de ressonância da banda superior. Nesse caso, foi possível realizar a variação de 5 GHz para 3,5 GHz, de modo a atender o sistema CBRS. O monopolo foi o responsável principal pela ressonância da banda intermediária em 2,4 GHz, juntamente com o *slot*, o qual passou por uma análise paramétrica até serem encontradas as dimensões que melhor se adequavam para estimular essa banda de frequência. Verificou-se que, por meio da reconfiguração com diodos PIN, é possível ajustar a antena para que se obtenha comportamento *single-band*, *dual-band* ou *tri-band*.

Foi construído um protótipo para atender os sistemas IEEE 802.11ah e IEEE 802.11ax e um protótipo reconfigurável para atender os sistemas IEEE 802.11ah, IEEE 802.11ax (banda inferior) e CBRS. Ambos foram construídos sobre um substrato de FR-4, medidos por meio do analisador de rede vetorial e, em seguida, comparados com os resultados simulados mediante o uso do *software ANSYS HFSS*. Os resultados simulados e medidos foram concordantes verificando-se a validade do estudo.

Como proposta de trabalhos futuros, pretende-se desenvolver uma antena planar de microfita para atender as quatro bandas de frequências simultaneamente, 900 MHz, 2,4 GHz,

3,5 GHz e 5 GHz. Além disso, objetiva-se aplicar a reconfiguração para que seja possível alcançar qualquer combinação de frequências entre as quatro mencionadas anteriormente.

Outra sugestão de trabalhos futuros é o desenvolvimento de Superfície Seletiva de Frequência para aprimoramento do ganho da antena nas bandas de frequências dos sistemas de comunicação sem fio utilizados neste trabalho.

---

## Referências Bibliográficas

---

- [1] Wi-Fi Alliance Whitepaper, "Wi-Fi 6: High Performance, Next Generation Wi-Fi", Outubro 2018.
- [2] SUN, Y. X.; et al. "Compact Dual-Frequency Antenna for 2.4/60 GHz Applications", *10<sup>th</sup> Global Symposium on Milimeter-Waves*, pp. 100-103, Julho 2017.
- [3] CAO, Y. F.; et al. " A Multiband Slot Antenna for GPS/WiMAX/WLAN Systems", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 63, no. 3, pp. 952-958, Março 2015.
- [4] SZE, J.Y.; CHANG, W. "Dual-band Square Slot Antenna with Embedded Crossed Strips for Wireless Local Area Network Applications", *Microwave and Optical Technology Letters*, Vol. 51, no. 2, pp. 435-439, Fevereiro 2009.
- [5] ADAME, T.; et al. "IEEE 802.11ah: The Wi-Fi Approach for M2M Communications", *IEEE Wireless Magazine*, Outubro 2014.
- [6] AKEELA, R.; ELZIQ, Y. "Design and Verification of IEEE 802.11ah for IoT and M2M Applications", *IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops*, Maio 2017.
- [7] DENG, D.-J.; et al. "On Quality-of-Service Provisioning in IEEE 802.11ax WLANs", *IEEE Access - Green Communication and Networking for 5G Wireless*, Vol. 4, pp. 6086-6104, Agosto 2016.
- [8] AFAQUI, M.; et al. "IEEE 802.11ax: Challenges and Requirements for Future High Efficiency Wi-Fi", *IEEE Wireless Communications*, Vol. 24, Dezembro 2016.
- [9] Wi-Fi Alliance, "Wi-Fi HaLow: Low Power, Long Range Wi-Fi", Disponível em: <<https://www.wi-fi.org/discover-wi-fi/wi-fi-halow> >. Acesso em: 13 de Outubro de 2018.
- [10] Wi-Fi Alliance, "Wi-Fi 6: Next Generation Wi-Fi Connectivity", Disponível em: <<https://www.wi-fi.org/discover-wi-fi/wi-fi-6>>. Acesso em: 13 de Outubro de 2018.
- [11] CBRS Alliance Whitepaper, "CBRS: New Shared Spectrum Enables Flexible Indoor and Outdoor Mobile Solutions and New Business Models", Março 2017.
- [12] 5G Americas Whitepaper, "Spectrum Recommendations for the U.S.", Abril 2018.

- [13] SUN, W.; et al. "IEEE 802.11ah: A Long Range 802.11 WLAN at Sub 1 GHz", *Journal of ICT Standardization*, Vol. 1, pp. 83-108, Maio 2018.
- [14] BEL, A.; et al. "An Energy Consumption Model for IEEE 802.11ah WLANs", *Journal of Latex Class Files*, Vol. 13, no. 9, Setembro 2014.
- [15] GONG, M.; et al. "Advanced Wireless LAN Technologies: IEEE 802.11ac and Beyond", *Mobile Computing and Communications*, Vol. 18, no. 4, pp. 48-52, Outubro 2014.
- [16] TONNEMACHER, M.; et al. "Opportunistic Channel Access Using Reinforcement Learning in Tiered CBRS Networks", *IEEE International Symposium on Dynamic Spectrum Access Networks*, Outubro 2018.
- [17] YRJOLA, S. "Analysis of blockchain use cases in the Citizens Broadband Radio Service spectrum sharing concept", *International Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks*, Fevereiro 2018.
- [18] SU, C.-M.; et al. "Shorted T-Shaped Monopole Antenna for 2.4/5 GHz WLAN Operation", *Microwave and Optical Technology Letters*, Vol. 41, no. 3, pp. 202-203, Maio 2004.
- [19] KUO, Y.-L.; et al. "Printed Double-T Monopole Antenna for 2.4/5.2 GHz Dual-Band WLAN Operations", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 51, no. 9, pp. 2187-2192, Setembro 2003.
- [20] PAN, C.-Y.; et al. "Dual wideband printed monopole antenna for WLAN/WiMAX applications", *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, Vol. 6, pp. 149-151, 2007.
- [21] SZE, J.-Y.; et al. "Dual-band square slot antenna with embedded crossed strips for wireless local area network applications", *Microwave and Optical Technology Letters*, Vol. 51, no. 2, pp. 435-439, Fevereiro 2009.
- [22] ZHU, J.; ELEFTHERIADES, G. "Dual-band metamaterial-inspired small monopole antenna for WiFi applications", *Electronics Letters*, Vol. 45, no. 22, Outubro 2009.
- [23] OJAROUDI, M.; et al. "Small Square Monopole Antenna With Inverted T-Shaped Notch in the Ground Plane for UWB Application", *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, Vol. 8, pp. 728-731, Junho 2009.
- [24] HU, W.; et al. "A Wide Open U-Slot Antenna with a Pair of Symmetrical L-Strips for WLAN Applications", *Electromagnetics Research Letters*, Vol. 16, pp. 141-149, 2010.

- [25] HU, W.; et al. "Compact printed antenna with h-shaped stub for dual-band operation", *Eletromagnetics Research Letters*, Vol. 46, no. 25, Dezembro 2010.
- [26] DANG, L.; et al. "A Compact Microstrip Slot Triple-Band Antenna for WLAN/WiMAX Applications", *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, Vol. 9, pp. 1178-1181, Dezembro 2010.
- [27] LIU, W.-C.; et al. "Design of Triple-Frequency Microstrip-Fed Monopole Antenna Using Defected Ground Structure", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 59, no. 7, pp. 2457-2463, Julho 2011.
- [28] HU, W.; et al. "Compact Triband Square-Slot Antenna With Symmetrical L-Strips for WLAN/WiMAX Applications", *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, Vol. 10, pp. 462-465, Maio 2011.
- [29] BOD, M.; et al. "Compact UWB Printed Slot Antenna With Extra Bluetooth, GSM, and GPS Bands", *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, Vol. 11, pp. 531-534, Maio 2012.
- [30] SUN, X.-L.; et al. "Dual-Band Antenna With Compact Radiator for 2.4/5.2/5.8 GHz WLAN Applications", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 60, no. 12, pp. 5924-5931, Dezembro 2012.
- [31] DUTTA, S.; et al. "A Compact Triple-band Multi-polarized Slot Antenna for WLAN/WiMAX Application", *International Conference on Microwave and Photonics*, Fevereiro 2017.
- [32] SHAH, S. M.; et al. "Frequency Reconfiguration Mechanism of a PIN Diode on a Reconfigurable Antenna for LTE and WLAN Applications", *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, Junho 2018.
- [33] ABDULRAHEEM, Y. I.; et al. "Design of Frequency Reconfigurable Multiband Compact Antenna using two PIN diodes for WLAN/WiMAX Applications", *IET MAP Journal*, Fevereiro 2017
- [34] MAJID, H. A.; et al. "Frequency Reconfigurable Microstrip Patch Antenna", *IEEE Asia-Pacific Conference on Applied Electromagnetics*, Dezembro 2012.
- [35] Infineon, "Datasheet BAR64-05", Disponível em: <  
[https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-BAR64-05-DS-v01\\_01-EN.pdf?fileId=5546d462689a790c01690f026ce63904](https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-BAR64-05-DS-v01_01-EN.pdf?fileId=5546d462689a790c01690f026ce63904) >. Acesso em: 17 de março 2019.