



Universidade Federal de Ouro Preto  
Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas  
Departamento de Engenharia Elétrica



## **Trabalho de Conclusão de Curso**

# **Projeto de uma Antena Planar de Microfita MIMO 2X2 com Fenda Bow-Tie no Plano Terra Integrada a uma FSS para Aplicações 5G**

**Fernando Silva da Rocha**

João Monlevade, MG  
2024

**Fernando Silva da Rocha**

**Projeto de uma Antena Planar de Microfita  
MIMO 2X2 com Fenda Bow-Tie no Plano Terra  
Integrada a uma FSS para Aplicações 5G**

Trabalho de Conclusão de curso apresentado à Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Elétrica pelo Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas da Universidade Federal de Ouro Preto.

Orientadora: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Aline Rocha de Assis

Co-orientadora: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Fernanda Rodrigues da Silva

**Universidade Federal de Ouro Preto  
João Monlevade  
2024**

## SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

R672p Rocha, Fernando Silva da.  
Projeto de uma antena planar de microfita MIMO 2X2 com fenda bow-tie no plano terra integrada a uma FSS para aplicações 5G. [manuscrito] / Fernando Silva da Rocha. - 2024.  
43 f.

Orientadora: Profa. Dra. Aline Rocha de Assis.  
Coorientadora: Profa. Dra. Fernanda Rodrigues da Silva.  
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto.  
Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas. Graduação em Engenharia Elétrica .

1. Antenas (Eletrônica). 2. Comunicações digitais. 3. Engenharia elétrica. 4. Superfícies seletivas de frequência. 5. Telecomunicações. I. Assis, Aline Rocha de. II. Silva, Fernanda Rodrigues da. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU 621.39

Bibliotecário(a) Responsável: Flavia Reis - CRB6-2431



## FOLHA DE APROVAÇÃO

**Fernando Silva da Rocha**

**Projeto de uma Antena Planar de Microfita MIMO 2x2 com Fenda *BOW-TIE* no Plano Terra Integrada a uma FSS para Aplicações 5G**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Eletricista

Aprovada em 22 de Fevereiro de 2024

### Membros da banca

Dr<sup>a</sup> Aline Rocha de Assis - Orientador(a) Universidade Federal de Uberlândia  
Dr<sup>a</sup> Fernanda Rodrigues da Silva (coorientadora) - Universidade Federal de Itajubá  
Me. Pedro Arthur Bessa Leão - Universidade Federal de Ouro Preto  
Dr. Glauco Ferreira Gazel Yared - Universidade Federal de Ouro Preto

Aline Rocha de Assis, orientadora do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 2202/2024



Documento assinado eletronicamente por **Renan Fernandes Bastos, COORDENADOR(A) DO CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**, em 13/03/2024, às 17:24, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [http://sei.ufop.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **0683780** e o código CRC **B3E06589**.

# Agradecimentos

Agradeço a minha mãe Risete Silva da Rocha, que sempre fez o possível para que eu chegasse até aqui. Por todos os ensinamentos e valores que me foram passados, sendo um exemplo de superação.

Ao meu pai Dário da Rocha Saturnino, que mesmo não estando mais presente neste mundo, deixou um grande legado, sendo um exemplo como ser humano. Tenho certeza que ele está orgulhoso.

Aos meus irmãos Renata, Danilo e Liliane que sempre me apoiaram, entendendo meus momentos de ausência, sou muito grato por saber que tenho vocês.

A Prof<sup>a</sup> Dra. Aline de Rocha Assis pela oportunidade e apoio na elaboração deste trabalho, estendendo este agradecimento à Prof<sup>a</sup> Dra Fernanda Rodrigues da Silva por toda colaboração e suporte.

Agradeço de forma especial Marilda e Pedro Paulo, por tudo que fizeram por mim, desde a minha chegada em Belo Horizonte. Tudo isso permitiu com que eu chegasse a esse momento. Não há palavras para agradecer!

Agradeço aos professores do curso de Engenharia Elétrica da Ufop, pelos ensinamentos transmitidos.

Agradeço a todos que de forma direta ou indireta fizeram parte da minha formação.

*"A vontade de se preparar tem que ser maior do que a vontade de vencer.  
Vencer será consequência da boa preparação."  
– Bob Knight*

# Resumo

O progresso das telecomunicações, especialmente da internet e telefonia móvel, oferece oportunidades para aprimorar a transmissão de informações à distância e redução de custos. Diversos serviços operam em faixas de frequência específicas, frequentemente com características distintas de polarização e radiação, resultando na necessidade de integrar diversas estruturas de antenas em um dispositivo. A solução para evitar múltiplas antenas é o uso de antenas compactas multi-banda. As antenas de microfita, desenvolvidas para atender à miniaturização de dispositivos, encontram aplicação nas comunicações móveis, radares e satélites. Embora apresentem limitações em largura de banda, ganho e diretividade, essas desvantagens podem ser superadas utilizando técnicas de arranjo de elementos radiantes, ou pela incorporação de Superfícies Seletivas em Frequência (FSS), estruturas periódicas que podem melhorar o desempenho das antenas. O objetivo deste trabalho é desenvolver uma antena de microfita do tipo MIMO, acoplada a uma FSS para aplicações em faixas de frequência da tecnologia 5G.

**Palavras-chave:** Telecomunicações, antenas de microfita, antenas MIMO, Superfícies Seletivas em Frequência, FSS.

# Abstract

The progress of telecommunications, particularly in internet and mobile telephony, offers opportunities to enhance long-distance information transmission and cost reduction. Various services operate in specific frequency bands, often with distinct polarization and radiation characteristics, resulting in the need to integrate diverse antenna structures into a single device. The solution to avoid multiple antennas is the use of compact multi-band antennas. Microstrip antennas, developed to cater to device miniaturization, find applications in mobile communications, radars, and satellites. Although they present limitations in bandwidth, gain, and directivity, these disadvantages can be overcome using techniques involving the arrangement of radiating elements or by the incorporation of Frequency Selective Surfaces (FSS), periodic structures that can enhance antenna performance. The primary objective of this study is to develop a MIMO-type microstrip antenna coupled with an FSS for applications in the frequency bands of 5G technology.

**Keywords:** Telecommunications, microstrip antennas, MIMO antennas, Frequency Selective Surfaces, FSS.



# Lista de ilustrações

Figura 1 – Representação de uma antena de microfita . . . . .	6
Figura 2 – Formas do <i>patch</i> das antenas de microfita: (a) Quadrado, (b) Retangular, (c) Dipolo, (d) Circular, (e) Elíptico, (f) Triangular, (g) Setor circular, (h) Anel circular e (i) Setor de anel . . . . .	6
Figura 3 – Rede de duas portas para os quatro parâmetros de espalhamento: $S_{11}$ , $S_{22}$ , $S_{12}$ e $S_{21}$ . . . . .	8
Figura 4 – Esquema exemplificando um sistema MIMO. . . . .	8
Figura 5 – Tipos de elementos de FSS: Elementos tipo (a) abertura e (b) elementos condutores. . . . .	9
Figura 6 – Grupo 1: N - polos conectados ao centro . . . . .	10
Figura 7 – Grupo 2: Tipos de loop . . . . .	11
Figura 8 – Grupo 3: Elementos tipo interior sólido . . . . .	11
Figura 9 – Grupo 4: Combinações . . . . .	11
Figura 10 – Outras geometrias: (a) Estrela de quatro braços, (b) Matrioska e (c) Forma de U. . . . .	12
Figura 11 – Exemplo de fractal: (a) Bipolo de Sierpinski com duas iterações. (b) FSS de Sierpinski. . . . .	12
Figura 12 – Vista superior da antena de microfita com fenda bow-tie no plano terra. . . . .	15
Figura 13 – Representação de uma antena de microfita. . . . .	15
Figura 14 – Coeficiente de reflexão da antena de microfita com fenda bow-tie no plano terra. . . . .	16
Figura 15 – Diagrama de radiação da antena proposta por Brito (2021): (a) Polar; (b) 3D. . . . .	16
Figura 16 – Representação do primeiro teste da antena de microfita MIMO com fenda bow-tie no plano terra. . . . .	17
Figura 17 – Coeficiente de reflexão do teste da antena de microfita com fenda bow-tie com 12mm na extremidade. . . . .	18
Figura 18 – Cálculo do Coeficiente de Extensão da Porta. . . . .	19
Figura 19 – Representação da vista superior da antena de microfita MIMO 2x2 com fendas bow-tie no plano terra. . . . .	19
Figura 20 – Simulado $S_{11}$ com variação na distância entre as fendas. . . . .	20
Figura 21 – Diagrama de radiação da antena MIMO: (a) Polar; (b) 3D. . . . .	20
Figura 22 – Coeficiente de Correlação Envelope de S. . . . .	22
Figura 23 – Representação da célula unitária da FSS. . . . .	24
Figura 24 – Condições de contorno da FSS. . . . .	25
Figura 25 – Célula unitária da FSS com suas portas. . . . .	25

Figura 26 – Parâmetros $S_{11}$ e $S_{21}$ obtidos através da simulação da célula unitária da FSS anel circular tipo abertura. . . . .	26
Figura 27 – Representação da antena de microfita integrada à FSS. . . . .	27
Figura 28 – Vista de perfil do conjunto antena e FSS . . . . .	28
Figura 29 – Comparativo dos níveis de reflexão ( $S_{11}$ ) da antena MIMO, do conjunto antena MIMO + FSS e antena de referência. . . . .	29
Figura 30 – Diagrama de radiação do conjunto antena e FSS: (a) Polar; (b) 3D . . . . .	29
Figura 31 – Comparativo do ECC da antena MIMO e conjunto antena MIMO + FSS . . . . .	30

# Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
<b>1.1</b>	<b>Objetivo geral</b>	<b>1</b>
<b>1.2</b>	<b>Objetivos específicos</b>	<b>2</b>
<b>1.3</b>	<b>Organização do trabalho</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>COMUNICAÇÕES MÓVEIS, ANTENAS DE MICROFITA, SISTEMAS MIMO E FSS</b>	<b>3</b>
<b>2.1</b>	<b>Evolução das Comunicações Móveis</b>	<b>3</b>
2.1.1	Da Primeira à Terceira Gerações	3
2.1.2	Quarta Geração (4G)	4
2.1.3	Quinta Geração (5G)	5
<b>2.2</b>	<b>Antenas de microfita</b>	<b>5</b>
<b>2.3</b>	<b>Matriz de espalhamento</b>	<b>7</b>
<b>2.4</b>	<b>Sistema MIMO</b>	<b>8</b>
2.4.1	Coeficiente de Correlação Envelope	9
<b>2.5</b>	<b>Superfícies Seletivas em Frequência (FSS)</b>	<b>9</b>
<b>2.6</b>	<b>Técnicas de Análise das FSS</b>	<b>12</b>
2.6.1	Métodos Assintóticos	12
2.6.2	Métodos de Onda Completa	13
<b>3</b>	<b>PROJETO DA ANTENA DE MICROFITA MIMO 2X2 COM FENDA BOW-TIE NO PLANO TERRA</b>	<b>14</b>
<b>3.1</b>	<b>Antena de referência</b>	<b>14</b>
<b>3.2</b>	<b>Projeto da Antena MIMO</b>	<b>17</b>
3.2.1	Cálculo do Coeficiente de Correlação Envelope	21
<b>4</b>	<b>PROJETO DA FSS</b>	<b>23</b>
<b>5</b>	<b>ANTENA PLANAR DE MICROFITA MIMO 2X2 INTEGRADA À FSS</b>	<b>27</b>
<b>6</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b>	<b>31</b>
<b>6.1</b>	<b>Trabalhos Futuros</b>	<b>32</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>33</b>

# 1 Introdução

Com o avanço das telecomunicações e, principalmente da internet e telefonia móvel, surgem novas possibilidades de reduzir os custos e melhorar a transmissão de informações à distância. Em virtude de uma quantidade cada vez maior de serviços ofertados, onde cada serviço opera em uma faixa de frequência específica, obtendo até características de polarização e radiação diferentes, torna-se necessária a integralização de estruturas de diferentes antenas nos dispositivos.

Para evitar o uso de múltiplas antenas em um dispositivo, a solução seria o uso de antenas compactas multi-banda, que são antenas que operam em diferentes bandas de forma simultânea. Foi justamente essa necessidade de implementar dispositivos com dimensões e peso cada vez menores (miniaturização), que permitiu o desenvolvimento das antenas de microfita. Neste contexto, de acordo com Andrade (2014), antenas de microfita são aplicadas em sistemas de comunicações móveis, radares, satélites e outras aplicações que tenham como requisitos de projeto estruturas que sejam leves e compactas, utilizando técnicas simples de circuitos impressos.

As antenas de microfita possuem baixa largura de banda, obtendo até baixos níveis de ganho e diretividade, o que fazem seu uso ser restrito. De acordo com Pinheiro (2016), tais desvantagens podem ser contornadas utilizando técnicas de arranjo de elementos radiantes nas antenas de microfita, obtendo assim, um maior valor de ganho e diretividade. A alternativa para a melhoria desses parâmetros, evitando contar com arranjos muito grandes, é a utilização de Superfícies Seletivas em Frequência (FSS), para obtenção de um arranjo de antenas pequeno.

As FSS são estruturas formadas por arranjos periódicos, geralmente planares, de elementos do tipo *patch* condutor (camada de metalização) ou elementos do tipo abertura ou uma combinação de ambas. Para Campos (2008), estruturas periódicas com elementos do tipo abertura podem ser usadas para fornecer características passa-faixa. Isso quer dizer que para a frequência de operação da antena, o sinal passa através da estrutura com um mínimo de perdas de inserção. Por outro lado, para frequências fora da banda de operação, o sinal é totalmente refletido.

No decorrer dos últimos anos, várias pesquisas têm sido voltadas ao desenvolvimento de novas geometrias, que possibilitem a miniaturização das antenas sem comprometer o desempenho dos circuitos (Mittra, Chan e Cwik (1988)).

## 1.1 Objetivo geral

Este trabalho tem como objetivo geral projetar uma antena de microfita do tipo MIMO (múltiplas entradas e múltiplas saídas), integrando-a a uma FSS para atuar como

filtro, de modo a rejeitar frequências indesejadas e transmitir as frequências de interesse com o foco em aplicações 5G.

## 1.2 Objetivos específicos

Em decorrência do objetivo geral acima mencionado, estabelece-se os seguintes objetivos específicos:

- Modelar uma geometria para uma antena de microfita e transformá-la em uma antena MIMO de modo que possa operar dentro da faixa de frequências do 5G;
- Definir uma geometria para a célula unitária da FSS, com a finalidade de rejeitar frequências indesejadas e melhorar o desempenho do conjunto;
- Realizar as simulações computacionais para avaliar as características relevantes da antena MIMO e da FSS.

## 1.3 Organização do trabalho

Capítulo 1: Apresenta-se a introdução ao assunto em geral, bem como a relevância, motivação e objetivos.

Capítulo 2: Apresenta-se a revisão bibliográfica referente à fundamentação teórica da tecnologia 5G e gerações que a antecedem, apresentação das antenas de microfita, descrição de sistemas do tipo MIMO e tipos de elementos, filtros e geometria que dão a descrição geral das FSS.

Capítulo 3: Apresenta-se o projeto da antena de microfita MIMO com fenda bow-tie no plano terra.

Capítulo 4: Apresenta-se o projeto da FSS, que integrada à antena de microfita, busca-se obter um melhor desempenho da mesma.

Capítulo 5: Apresenta-se e discute-se os resultados obtidos pela integração da antena de microfita proposta e a FSS.

Capítulo 6: Tem-se a conclusão do trabalho, onde são discutidos os resultados obtidos e as propostas para trabalhos futuros.

## 2 Comunicações Móveis, Antenas de Microfita, Sistemas MIMO e FSS

### 2.1 Evolução das Comunicações Móveis

A tecnologia de comunicação móvel tem evoluído de forma significativa nas últimas décadas, proporcionando avanços consideráveis na capacidade de transmissão de dados sem fio. No Brasil, não foi diferente, e a evolução para a tecnologia 5G representa um marco importante no cenário das telecomunicações.

O Brasil acompanhou a evolução das tecnologias móveis desde o surgimento da primeira geração (1G) na década de 1980 até o desenvolvimento do 4G, que foi amplamente implementado em todo o país. A transição para o 4G trouxe melhorias significativas na velocidade de dados e na capacidade de suporte a aplicativos e serviços mais avançados.

A chegada do 5G no Brasil representa um passo importante rumo à próxima era das comunicações móveis. O leilão das frequências para o 5G no Brasil ocorreu em novembro de 2021, quando grandes operadoras adquiriram as licenças ligadas à frequência de 3,5 GHz, para oferecer os serviços 5G em território nacional.

#### 2.1.1 Da Primeira à Terceira Gerações

A Primeira Geração de sistemas móveis (1G) surgiu nas décadas de 1970 e 1980, marcando o início das comunicações móveis em larga escala. De acordo com Roberts et al. (2006), os sistemas 1G eram baseados em tecnologia analógica para transmitir voz. O lançamento do sistema *Advanced Mobile Phone System* (AMPS) nos Estados Unidos em 1983 foi um marco importante que impulsionou a popularização dos dispositivos móveis.

Os sistemas 1G permitiram que as pessoas se comunicassem de forma móvel pela primeira vez, possibilitando a comunicação em trânsito. No entanto, esses sistemas apresentavam algumas limitações significativas, como a baixa qualidade de voz, susceptibilidade a interferências e capacidade restrita para acomodar uma grande quantidade de usuários simultaneamente.

A Segunda Geração (2G) representou uma transformação importante nas comunicações móveis, com a adoção da tecnologia digital. Segundo Halonen, Romero e Melero (2013), o desenvolvimento do 2G começou na década de 1990 e trouxe melhorias substanciais em relação à geração anterior. O padrão mais proeminente da segunda geração foi o *Global System for Mobile Communications* (GSM), desenvolvido na Europa nos anos 1980 e lançado comercialmente na década seguinte. A tecnologia digital do GSM proporcionou maior eficiência espectral, permitindo que mais usuários fossem atendidos

simultaneamente.

Além disso, a transição para o digital resultou em chamadas de voz mais claras e menos sujeitas a interferências, melhorando consideravelmente a qualidade das comunicações. O GSM também introduziu serviços de mensagens de texto (SMS), que se tornaram um recurso popular e abriram novas possibilidades de comunicação.

A Terceira Geração (3G) marcou um salto significativo nas comunicações móveis, trazendo velocidades mais rápidas de transmissão de dados e novos serviços de conectividade. O desenvolvimento da 3G teve início no final dos anos 1990, e os primeiros sistemas 3G foram lançados comercialmente no início dos anos 2000. Ainda segundo Roberts et al. (2006), uma das grandes inovações do 3G foi a capacidade de incorporar novos serviços móveis, como acesso à Internet e videochamadas.

A tecnologia 3G permitiu que os dispositivos móveis acessassem a internet em velocidades muito mais rápidas do que as gerações anteriores, com taxas de transferência de dados de megabits por segundo. Essa maior capacidade de acesso à internet abriu cenário para smartphones, aplicativos móveis, navegação na web, envio de e-mails e compartilhamento de arquivos, tornando os dispositivos móveis ainda mais versáteis e integrados ao cotidiano das pessoas.

### 2.1.2 Quarta Geração (4G)

A Quarta Geração (4G) representa um evento importante na evolução das comunicações móveis, proporcionando avanços substanciais em velocidade, capacidade e eficiência na transmissão de dados.

O 4G foi introduzido comercialmente no início da década de 2010, representando uma ascensão às tecnologias anteriores de terceira geração (3G). Para Gobjuka (2009), essa geração foi impulsionada pela necessidade crescente por uma maior capacidade de dados e pela crescente demanda por serviços e aplicativos mais sofisticados em dispositivos móveis.

De acordo com Lee et al. (2016), o padrão *Long Term Evolution* (LTE), padronizado pelo 3GPP, foi o principal destaque do 4G, trazendo relevantes avanços na transmissão de dados sem fio. O LTE permitiu velocidades de dados muito mais rápidas, alcançando várias dezenas de megabits por segundo em condições ideais, superando em muito as velocidades alcançadas pelas tecnologias 3G. Assim, conforme Roberts et al. (2006), o LTE melhorou significativamente a eficiência espectral, permitindo que mais dados fossem transmitidos utilizando a mesma largura de banda. Isso resultou em uma maior capacidade das redes, possibilitando que mais usuários fossem atendidos simultaneamente sem sacrificar a qualidade do serviço.

### 2.1.3 Quinta Geração (5G)

A Quinta Geração (5G) representa o auge da evolução das tecnologias de telecomunicações, oferecendo um conjunto avançado de recursos que abrem novas perspectivas para o mundo digital. De acordo com Figueiredo (2022), grandes arranjos de antenas tem sido uma das características das redes de 5G. A tecnologia MIMO (*Multiple-Input Multiple-Output*) tem um grande potencial de aumentar as eficiências espectral e energética dos sistemas de comunicações móveis.

O 5G começou a ser desenvolvido no final da década de 2010 e foi lançado comercialmente no início da década de 2020. Essa geração representa uma evolução relevante em relação ao 4G, buscando superar suas limitações e atender às crescentes demandas por maior capacidade, velocidade e confiabilidade das redes móveis. O padrão 5G foi desenvolvido por meio de uma colaboração global de organizações de padrões, operadoras e empresas de tecnologia, resultando em uma tecnologia mais abrangente e versátil (NETWORLD2020 et al., 2014).

O 5G reduziu significativamente a latência, que é o tempo de resposta entre o envio e o recebimento de dados. Conforme Warren e Dewar (2014), com latências ultrabaixas, o 5G tornou-se ideal para aplicações em tempo real, como jogos online, realidade virtual e carros autônomos, por exemplo. Embora o 5G traga inúmeros benefícios, também enfrenta desafios, como a necessidade de uma infraestrutura robusta e também enfrenta a questão a respeito da segurança de dados. Além disso, o desenvolvimento contínuo do 5G está expandindo suas capacidades e abrindo caminho para futuras inovações, como a implantação de frequências de ondas milimétricas, aprimoramentos na eficiência energética e o desenvolvimento de tecnologias para a Sexta Geração (6G) das comunicações móveis.

## 2.2 Antenas de microfita

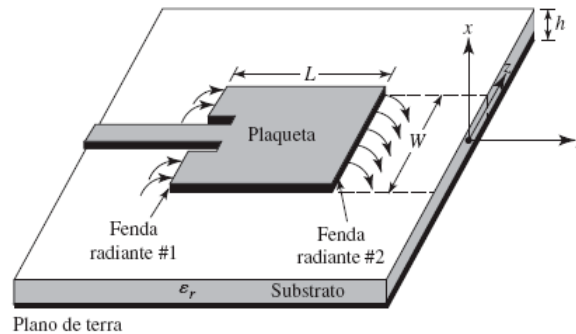
As antenas de microfita são encontradas em aplicações onde o tamanho, peso, custo, desempenho, facilidade de instalação e perfil aerodinâmico são considerados relevantes. Dentre tais aplicações pode-se citar aplicações aeronáuticas, aeroespaciais, de satélite e de mísseis de alto desempenho.

De acordo com Balanis (2009), antenas de microfita do tipo *patch* estão em um grupo de antenas planares com faixa de operação variando entre 100 MHz e 50 GHz, amplamente utilizadas na faixa de microondas. Esse tipo de antena é composto por uma placa radiante (*patch*) separada de um plano de terra por um substrato dielétrico. Também há um alimentador, por onde entra o sinal recebido ou o sinal que será radiado pela antena. A Figura 1 mostra uma representação da placa da antena.

Diferentes materiais podem ser utilizados como substrato no projeto de antenas de microfita e a constante dielétrica tem influência em certos parâmetros, como a frequência de ressonância, largura e dimensões de uma antena. Para um bom desempenho da antena,



Figura 1 – Representação de uma antena de microfita

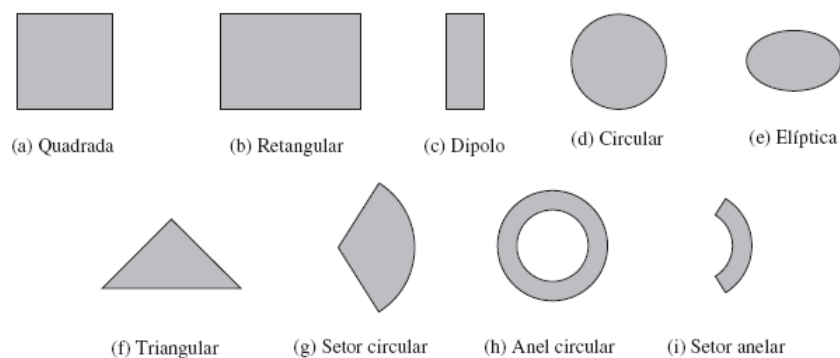


Fonte: Adaptado de Balanis (2009)

os substratos devem ser mais espessos e ter baixa constante dielétrica. Substratos delgados apresentando altos valores de constante dielétrica são desejáveis para circuitos de microondas, que exigem campos mais confinados, minimizando assim, a radiação e acoplamentos indesejáveis.

Há várias formas de se alimentar uma antena de microfita. Podendo ser através de um cabo coaxial, linha de microfita ou acoplamento, tanto por abertura quanto por proximidade. O *patch* pode apresentar diversas geometrias, sendo elas quadrada, retangular, circular, fractal, dentre outras. A Figura 2 apresenta algumas geometrias.

Figura 2 – Formas do *patch* das antenas de microfita: (a) Quadrado, (b) Retangular, (c) Dipolo, (d) Circular, (e) Elíptico, (f) Triangular, (g) Setor circular, (h) Anel circular e (i) Setor de anel



Fonte: Adaptado de Balanis (2009)

Dentre as vantagens apresentadas pelas antenas de microfita, pode-se citar as suas características de serem de baixo peso e custo, fabricação simples, capacidade de adaptar-se a estruturas de diferentes formas e facilidade de integração à outros dispositivos. Por outro lado, esse tipo de antena apresenta desvantagens, como baixa eficiência e capacidade diretiva, mas que quando montadas em arranjo de vários elementos, pode-se obter uma

diretividade satisfatória.

## 2.3 Matriz de espalhamento

A matriz de espalhamento (*scattering matrix*), também conhecida como parâmetro-S, é uma ferramenta essencial para a análise e caracterização de antenas. De acordo com Pozar (2011), esse parâmetro descreve o comportamento de uma antena em relação às suas portas de entrada e saída, permitindo a compreensão das propriedades de transmissão e reflexão do sistema.

O parâmetro-S é uma matriz que relaciona as ondas incidentes, refletidas e transmitidas em um sistema de  $N$  portas, onde para o escopo deste trabalho serão considerados sistemas com duas portas. Para uma antena, o parâmetro-S relaciona as amplitudes e fases das ondas incidentes e refletidas em suas portas de entrada. De acordo com Orfanidis (2016), a matriz de espalhamento é expressa como mostra a Equação 2.1, onde:

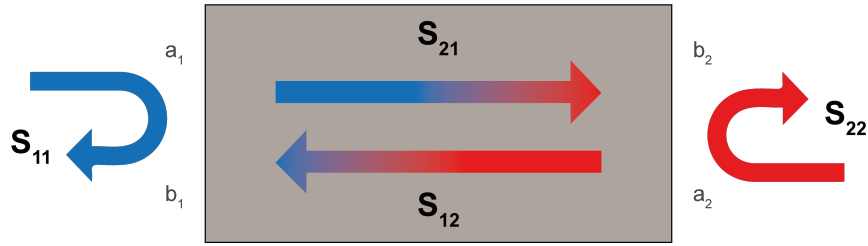
$$S = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

- $S_{11} = \frac{b_1}{a_1}$ : representa a relação entre a onda refletida na Porta 1 e onda incidente na Porta 1;
- $S_{12} = \frac{b_1}{a_2}$ : representa a relação entre a onda refletida na Porta 1 e onda incidente na Porta 2;
- $S_{21} = \frac{b_2}{a_1}$ : representa a relação entre a onda refletida na Porta 2 e onda incidente na Porta 1;
- $S_{22} = \frac{b_2}{a_2}$ : representa a relação entre a onda refletida na Porta 2 e onda incidente na Porta 2.

Para Collin (1992), a partir da matriz de espalhamento, podemos obter informações importantes sobre a antena, como a sua impedância de entrada e potências transmitida e refletida. Os elementos  $S_{11}$  e  $S_{22}$  fornecem informações a respeito da reflexão de ondas da antena, enquanto os elementos  $S_{12}$  e  $S_{21}$  indicam a transmissão de energia entre as portas do dispositivo, como pode ser visto na Figura 3.

O conhecimento dos Parâmetros-S é fundamental para o projeto e análise de antenas, pois eles permitem uma compreensão abrangente do comportamento da antena em diferentes situações. A partir dos valores de parâmetro-S, ajustes podem ser feitos nos elementos da antena a fim de melhorar o seu desempenho, tornando-a mais eficiente e adequada para um determinado requisito de projeto.

Figura 3 – Rede de duas portas para os quatro parâmetros de espalhamento:  $S_{11}$ ,  $S_{22}$ ,  $S_{12}$  e  $S_{21}$ .

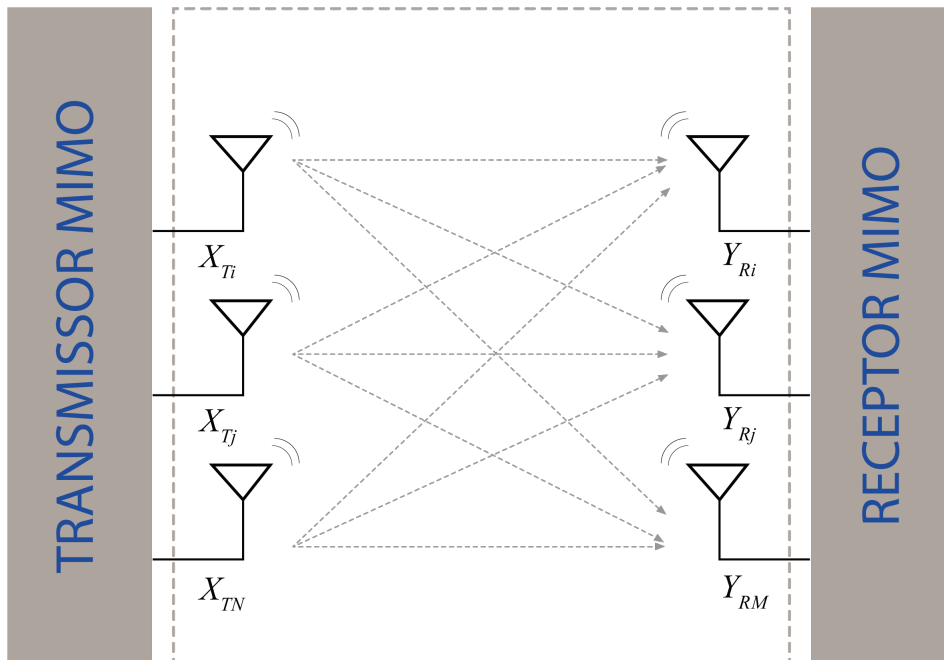


Fonte: Autor

## 2.4 Sistema MIMO

Um sistema MIMO (*Multiple-Input Multiple-Output*) é descrito como um sistema que possui múltiplas entradas e múltiplas saídas, ou seja, o sistema pode ter múltiplas antenas transmissoras e múltiplas antenas receptoras. A Figura 4 ilustra um sistema MIMO com  $N$  antenas transmissoras e  $M$  antenas receptoras. De acordo com Foudazi, Mallahzadeh e Nezhad (2012) um sistema MIMO é caracterizado por utilizar várias antenas para aumentar a capacidade do canal. Isso significa aumentar a capacidade de transmissão de dados, sem aumentar a largura de banda disponível e proporcionando uma maior confiabilidade à rede. Um sistema MIMO confere também uma melhoria no desempenho em ambientes com múltiplos caminhos e diminuição do erro de transmissão. Dentre as desvantagens desta configuração, pode-se citar que tal sistema é susceptível a interferências.

Figura 4 – Esquema exemplificando um sistema MIMO.



Fonte: Autor

### 2.4.1 Coeficiente de Correlação Envelope

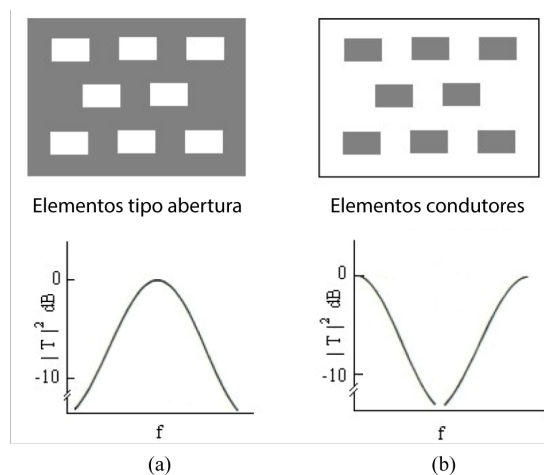
Um dos principais parâmetros para avaliar o desempenho de um sistema de antenas MIMO é o *Envelope Correlation Coefficient* (ECC) ou Coeficiente de Correlação de Envelope. Este parâmetro foi sugerido por Blanch, Romeu e Corbella (2003) e tem a vantagem de não necessitar de análise dos padrões de radiação da antena para obtenção de informações sobre a interferência no sistema. Este fator facilita a compreensão dos efeitos causados pela eficiência de acoplamento mútuo e diversidade do sistema de antenas e é calculado a partir dos valores reais e imaginários da matriz de espalhamento (Parâmetro-S), como pode ser visto na Equação 2.2.

$$\rho_{e21} = \frac{|S_{11}^* S_{21} + S_{12}^* S_{22}|^2}{(1 - (|S_{11}|^2 - |S_{21}|^2))(1 - (|S_{22}|^2 - |S_{12}|^2))} \quad (2.2)$$

## 2.5 Superfícies Seletivas em Frequência (FSS)

Uma FSS é uma superfície periódica, que seletivamente controla as características de frequência de uma onda eletromagnética incidente. De acordo com Mittra, Chan e Cwik (1988), as FSS compreendem de arranjos de elementos metálicos ou elementos de abertura dispostos de forma periódica dentro de uma tela metálica e exibem característica de reflexão total (*patches*) ou transmissão (aberturas) na vizinhança de ressonância do elemento, conforme pode ser visto na Figura 5. Segundo Moura (2015), as estruturas das FSS são formadas por arranjos geométricos metalizados ou em fendas e estão dispostos em uma superfície dielétrica com formas periódicas. Essas estruturas fazem com que as FSS se comportem como filtros passa-faixa ou rejeita-faixa dependendo da forma com que seus arranjos estão distribuídos.

Figura 5 – Tipos de elementos de FSS: Elementos tipo (a) abertura e (b) elementos condutores.



Fonte: Adaptado de Campos (2008)

As FSS podem funcionar de forma ativa ou passiva, dependendo de quais componentes são utilizados na sua construção. A FSS ativa é composta de estruturas periódicas usando dispositivos ativos, como transistores, sejam eles dispostos nos elementos impressos ou no substrato da placa. Um dos princípios de funcionamento é o de controlar a propriedade de frequência desses arranjos. Ao passo que a FSS passiva é projetada para atuar sobre uma determinada frequência a ser transmitida ou refletida. Se por um lado esse tipo de estrutura não pode ser reconfigurada, por outro, são de simples fabricação. Segundo Pinheiro (2016), tais estruturas são capazes de agir de modo similar aos filtros de circuitos tradicionais de radiofrequência, com capacidade de melhorar o desempenho de antenas nos seus vários aspectos de radiação. A capacidade de filtragem varia de acordo com tipo, dimensões e distância dos elementos do arranjo.

Na literatura existe uma gama variada de pesquisas que utilizam as mais diversas formas de elementos de FSS, onde os circulares e retangulares são encontrados com maior frequência. Munk (2000) divide os elementos em quatro grupos, sendo eles:

- Grupo 1: Centro conectado ou n-pólos;
- Grupo 2: Tipos de loops, como loops circulares, quadrados e hexagonais;
- Grupo 3: Elementos tipo interior sólido ou placas de várias formas;
- Grupo 4: Combinações.

O Grupo 1 é referente aos N – pólos conectados pelo centro e as formas mais comuns são: os dipolos cruzados, tripolos e as cruzes de Jerusalém. Tais formas podem ser vistas na Figura 6.

Figura 6 – Grupo 1: N - polos conectados ao centro



Fonte: Adaptado de Kiani (2009)

Os elementos membros do Grupo 2 são formados por loops quadrados, anéis e tripolos em loop. Esse grupo é provavelmente o mais popular. A Figura 7 apresenta algumas formas deste grupo.

Figura 7 – Grupo 2: Tipos de loop



Fonte: Adaptado de Kiani (2009)

Dentre os elementos pertencentes ao Grupo 3, podemos citar o tipo *patch*. Esta configuração permite criação de uma ou mais camadas e pode ser vista na Figura 8.

Figura 8 – Grupo 3: Elementos tipo interior sólido



Fonte: Adaptado de Kiani (2009)

As combinações podem ser bastante úteis na solução de problemas como, por exemplo, a estabilidade angular de diferentes polarizações que são difíceis de alcançar com as FSS de elemento único. A Figura 9 mostra algumas combinações possíveis do Grupo 4.

Figura 9 – Grupo 4: Combinações

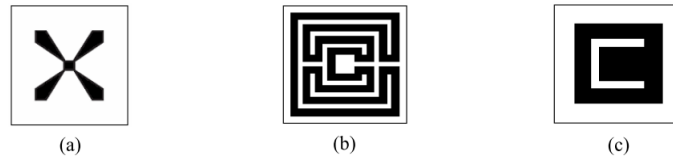


Fonte: Adaptado de Kiani (2009)

Um exemplo de aplicação utilizando diferentes formas de geometrias para as FSS é mostrado na Figura 10. Existem também as formas fractais, que se caracterizam por apresentar diversos níveis. Cada nível de fractal representa a quantidade de repetições presentes na forma, aumentando a sua complexidade e também possibilitando sua miniaturização. Sobre os formatos de fractais pode-se citar *Koch*, *Sierpinski*, *Dürer*, entre

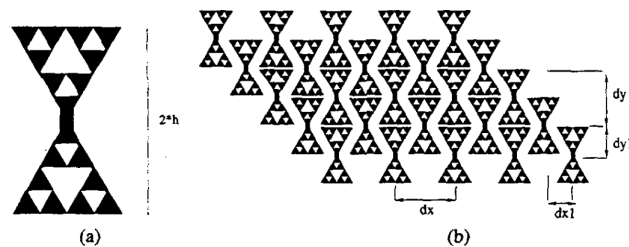
outros (Pinheiro (2016)). Na Figura 11 é apresentado um exemplo de fractal com a FSS de Sierpinski.

Figura 10 – Outras geometrias: (a) Estrela de quatro braços, (b) Matrioska e (c) Forma de U.



Fonte: Adaptado de Moura (2015)

Figura 11 – Exemplo de fractal: (a) Bipolo de Sierpinski com duas iterações. (b) FSS de Sierpinski.



Fonte: Adaptado de Romeu e Rahmat-Samii (1988)

## 2.6 Técnicas de Análise das FSS

Várias técnicas numéricas de análise tem sido empregadas para o estudo das FSS. Há na literatura uma vasta gama de técnicas feitas em anteparos periódicos. As técnicas podem ser divididas em métodos de onda completa e métodos aproximados.

### 2.6.1 Métodos Assintóticos

Para Pinheiro (2016), uma das técnicas de análise mais encontradas na bibliografia é o método do circuito equivalente (ECM). Este método proporciona resultados satisfatórios com baixo esforço computacional. Segundo Campos (2008), nesse tipo de análise os vários segmentos de fita que formam o elemento condutor do arranjo periódico são modelados como componentes indutivos ou capacitivos em uma linha de transmissão. Da solução deste circuito é usado uma aproximação para o cálculo dos componentes.

Já de acordo com Huang, Wu e Lee (1994) o método de aproximação é o método do circuito equivalente usando expansão modal (MDECM). Esta técnica de análise fornece detalhes das respostas em frequência e da polarização, juntamente com conhecimento físico e seu desempenho.

### 2.6.2 Métodos de Onda Completa

Os métodos de onda completa fornecem maior precisão nos seus resultados. Em contrapartida, exigem um custo computacional elevado. Ainda de acordo com Pinheiro (2016), dentre as técnicas de onda completa, a técnica das diferenças finitas no domínio do tempo (FDTD), que se baseia em equações diferenciais parciais, apresenta um melhor desempenho computacional. Esta técnica permite analisar qualquer elemento e suas respectivas perdas dielétricas e magnéticas. Este método é empregado pelo *software* CST STUDIO SUITE<sup>®</sup>, utilizado para realizar a simulação da estrutura FSS proposta neste trabalho.



## 3 Projeto da Antena de Microfita MIMO 2x2 com fenda bow-tie no plano terra

As antenas de microfita que apresentam aberturas no plano terra, segundo Le, Tran e Park (2018), têm sido objeto de grande estudo devido às suas importantes características. Entre essas características, destacam-se a boa largura de banda, correspondência de impedância e a capacidade de permitir a integração completa de componentes, sejam eles ativos ou passivos. Já de acordo com Kharche et al. (2017), as antenas MIMO tem ganhado importância devido a sua habilidade de melhorar a confiabilidade e a capacidade do canal. Mais recentemente, de acordo com Khan et al. (2022), as antenas MIMO tornaram-se componentes essenciais nos sistemas de comunicação sem fio atuais, pois podem reduzir a interferência e melhorar a qualidade da conexão e a capacidade do canal sem exigir mais largura de banda. As interações de ondas eletromagnéticas entre elementos próximos, que afetam os parâmetros da antena, como largura de banda, ganho e padrão de radiação, são um grande desafio no projeto deste tipo de antena.

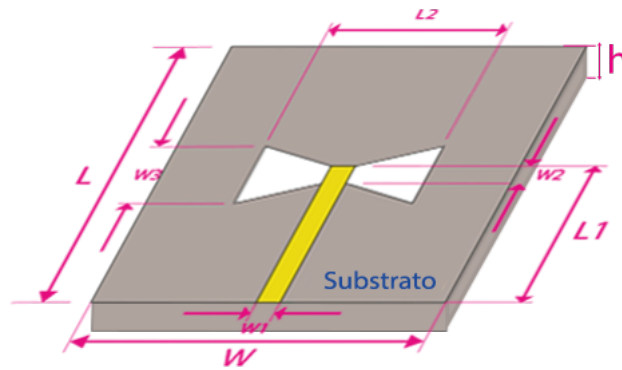
### 3.1 Antena de referência

O trabalho teve como referência a tese desenvolvida por Brito (2021), no qual o autor utilizou fendas no plano terra nas antenas planares de microfita, com a finalidade de obter resultados como aumento do ganho e largura de banda da antena. Na referida tese o autor projetou, inicialmente, dois tipos de antenas, sendo a primeira com fenda retangular e a segunda com fenda bow-tie, tendo esta última uma variação no tamanho de sua extremidade ( $W_3$ ). Embora a antena com fenda bow-tie apresente uma simplicidade na construção, também permite um aprimoramento do desempenho da antena, em vista de formas mais complexas. Neste trabalho, inicialmente, foram simuladas antenas com fenda bow-tie proposta na tese para avaliar o desempenho da mesma, conforme ilustrado na Figura 12.

Para o projeto simulacional da antena utilizou-se o FR-4 como substrato, tendo este, uma espessura de  $h = 1,57$  mm e uma permissividade relativa de  $\epsilon_r = 4,3$ . Além disso, a antena apresenta as seguintes dimensões:  $W = L = 30$  mm,  $W_1 = W_2 = 3$  mm e  $L_1 = L_2 = 16,5$  mm e extremidade  $W_3 = 12$  mm.

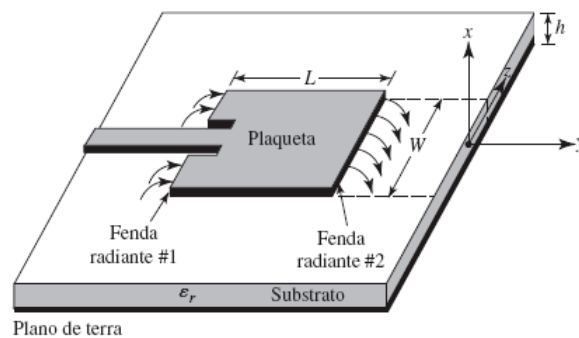
De início, no sentido de analisar os resultados obtidos por Brito (2021), foi realizada uma simulação da antena planar de microfita com fenda bow-tie, utilizando o *software* CST STUDIO SUITE®, através de acesso remoto ao Laboratório de Circuitos Integrados da Universidade Federal de Itajubá (Unifei), *campus* Itabira. Então para esta simulação foi escolhida a antena com extremidade ( $W_3$ ) de 12 mm, uma vez que esta configuração tem

Figura 12 – Vista superior da antena de microfita com fenda bow-tie no plano terra.



Fonte: Autor

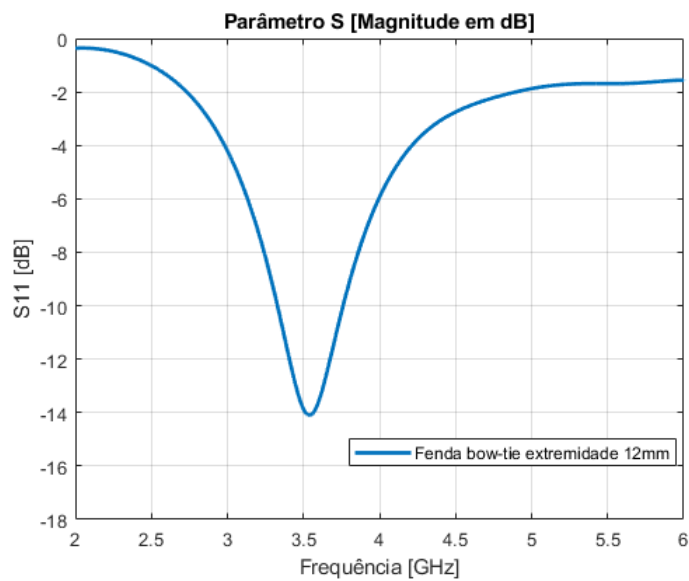
Figura 13 – Representação de uma antena de microfita.



Fonte: Adaptado de Balanis (2009)

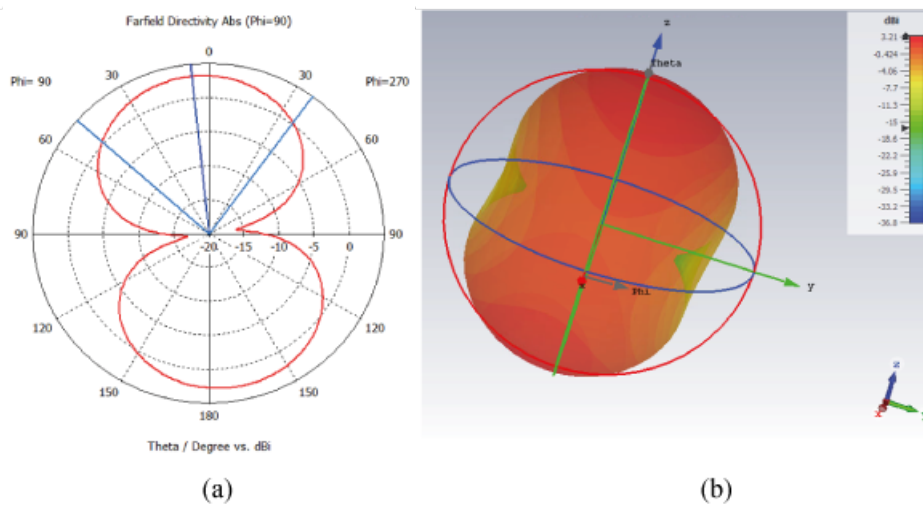
um valor mais próximo da frequência de 3,5 GHz, que foi estabelecida neste trabalho para operar na faixa da tecnologia 5G. De acordo com a Figura 14, que apresenta o coeficiente de reflexão ( $S_{11}$ ) da antena, é possível observar que o valor de  $S_{11}$  é de -14,1 dB. Dessa forma é possível afirmar que a simulação se aproximou dos resultados obtidos por Brito (2021).

Figura 14 – Coeficiente de reflexão da antena de microfita com fenda bow-tie no plano terra.



Fonte: Autor

Figura 15 – Diagrama de radiação da antena proposta por Brito (2021): (a) Polar; (b) 3D.



Fonte: Autor

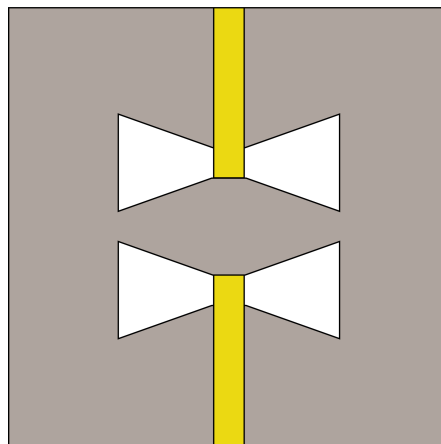
Tabela 1 – Resultados obtidos do diagrama de radiação da antena proposta por Brito (2021).

Parâmetro	
Ganho (dBi)	3,21
Diretividade (dBi)	3,212
Eficiência de radiação (dB)	-1,605
Eficiência total (dB)	-3,630

## 3.2 Projeto da Antena MIMO

Do mesmo modo, com o objetivo de obter uma melhora nos parâmetros da antena, posteriormente à simulação da antena com fenda bow-tie no plano terra apresentada por Brito (2021), para este trabalho foi proposta uma modificação que transformasse a antena em estudo, em uma antena do tipo MIMO 2x2. Em conformidade ao que foi apresentado na tese, busca-se uma melhoria no desempenho da antena em termos da sua largura de banda e ganho. Em princípio, foram mantidas as dimensões originais da antena de referência, acrescentando outra fenda bow-tie e separando-as por uma determinada distância  $d$ , a partir da extremidade da fenda em questão. Inicialmente essa distância foi de 3 mm e o comprimento das linhas de microfita foi ajustado de forma que a linha de alimentação se ajustasse à base central da fenda, o que pode ser observado na vista superior da antena apresentada na Figura 16.

Figura 16 – Representação do primeiro teste da antena de microfita MIMO com fenda bow-tie no plano terra.

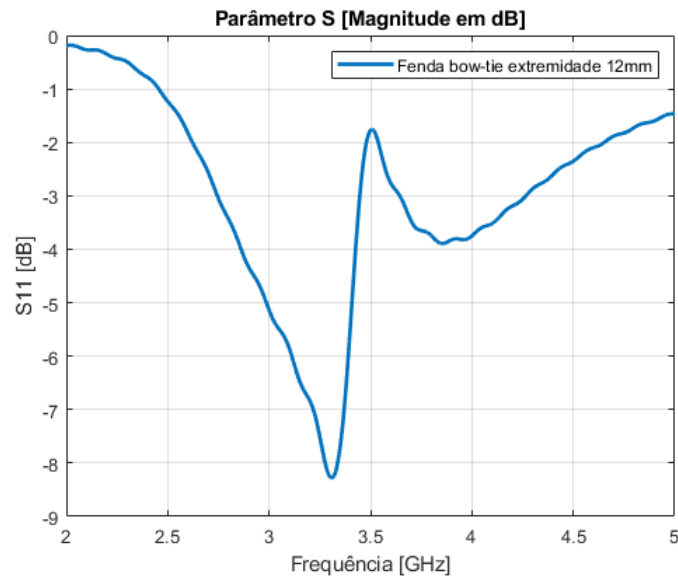


Fonte: Autor

O coeficiente de reflexão deste primeiro teste, apresentado na Figura 17, indicou que a modificação piorou o desempenho da antena. Certamente a proximidade física ocasionou em uma interferência entre as fendas, afetando a eficiência da antena e dos sinais recebidos e transmitidos. Portanto, uma distância suficiente entre fendas próximas torna-se necessária para reduzir o acoplamento mútuo e obter uma melhora nos parâmetros da antena.

Em virtude dos resultados obtidos no primeiro teste, foi necessário realizar uma modificação na antena, a fim de manter seu casamento de impedância. Para essa nova configuração foi efetuado um aumento no comprimento da antena, variando a distância entre a extremidade das fendas e, de forma simultânea, ajustando o comprimento da linha de microfita para que a mesma pudesse ficar ajustada à base central da bow-tie, conforme pode ser visto na Figura 19. As novas dimensões da antena são:  $W = 30$  mm e  $L = 60$

Figura 17 – Coeficiente de reflexão do teste da antena de microfita com fenda bow-tie com 12mm na extremidade.



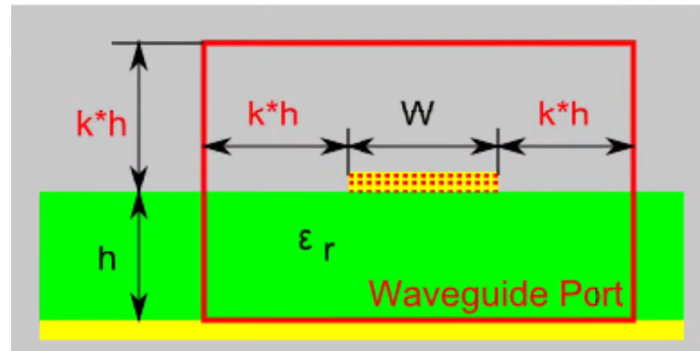
Fonte: Autor

mm (valores fixos); onde  $L_1$  e  $d$  variam de acordo com a posição das fendas. Através de uma análise paramétrica, as distâncias variaram a partir do posicionamento original da fenda bow-tie da antena de referência, observando-se seus níveis de reflexão. Além disso, os deslocamentos foram efetuados de forma que deslocava-se para cima a fenda inferior e para baixo a fenda superior da antena, coletando o valor da distância entre as extremidades das fendas.

Uma vez que o modelo da antena foi criado, foram adicionadas portas (ou *ports*) para as duas linhas de microfita na simulação. As portas são interfaces que conectam a antena ao circuito de alimentação e transmitem energia para a antena. No caso de uma antena de dupla linha de alimentação, cada linha de microfita foi conectada a uma porta separada. Para isso, através do *Solver* do CST, foi calculado o Coeficiente de Extensão da Porta (*Port Extension Coefficient*), que é uma medida da eficiência com que uma porta transmite ou recebe energia eletromagnética no modelo descrito. Essa medida permite entender e otimizar a eficiência das portas em um sistema de antenas. Desse modo, entraram como parâmetros a largura da linha de microfita ( $W_1$ ) e a espessura do substrato ( $h$ ), onde foi obtido o valor de  $k = 7,13$ . Através definição do valor de  $k$ , o mesmo permite o desenho da porta que alimentará a antena, como pode ser visto na Figura 18.

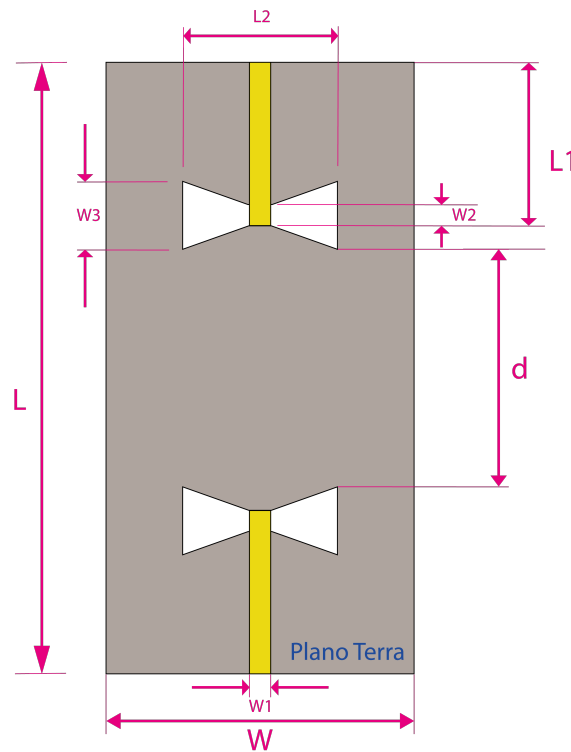
De acordo com a Figura 20, observa-se o comparativo entre o desempenho das antenas, conforme a variação da distância entre as fendas. Dentre as configurações projetadas na simulação, a antena com distância de 2 mm apresentou um melhor resultado em comparação às demais, obtendo uma frequência de  $f = 3,55$  GHz e um coeficiente de reflexão de  $S_{11} = -31,18$  dB. Através da análise dos parâmetros de reflexão da antena foi possível observar a

Figura 18 – Cálculo do Coeficiente de Extensão da Porta.



Fonte: CST

Figura 19 – Representação da vista superior da antena de microfita MIMO 2x2 com fendas bow-tie no plano terra.



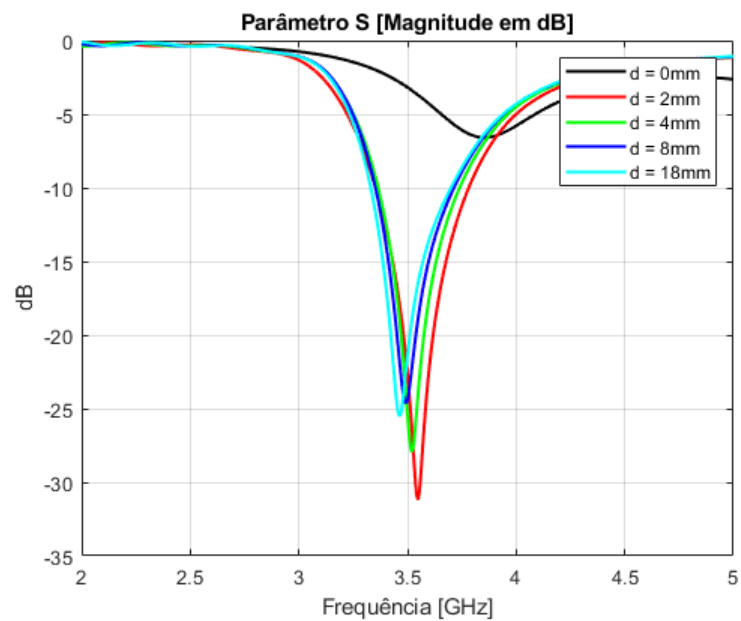
Fonte: Autor

simetria entre os parâmetros  $S_{11}$  e  $S_{22}$ . Isso significa que a quantidade de energia refletida na porta de entrada da antena é a mesma que na porta de saída, independentemente da direção do sinal incidente.

De acordo com a análise dos resultados obtidos através da variação de distância entre as extremidades das fendas, mostra que um parâmetro mais negativo de  $S_{11}$  indica que maior parte da potência incidente é transferida para a carga e uma quantidade mínima de potência é refletida de volta para a fonte, o que aponta que a antena com distância de

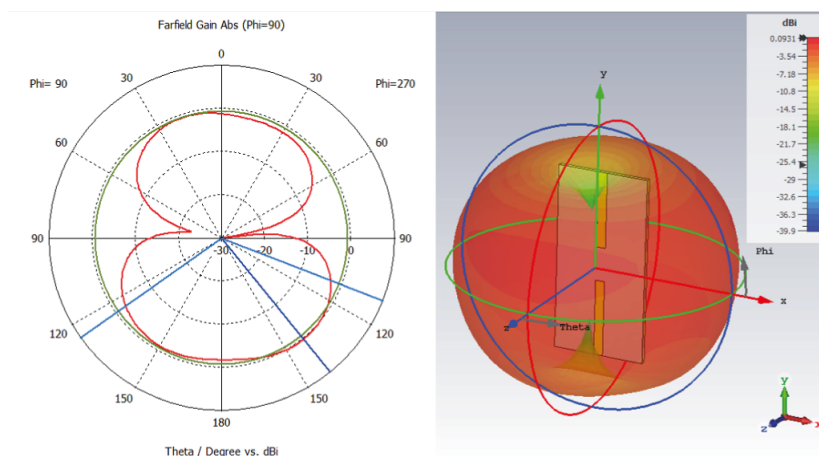
2 mm, entre as extremidades das fendas, apresenta uma melhor adaptação de impedância em comparação às demais configurações da antena. Para alcançar a frequência de interesse para uma das frequência do 5G (3,5 GHz) e melhorar o desempenho da antena, será necessário adicionar uma superfície que possa filtrar ou atenuar as frequências indesejadas, que possam interferir negativamente no desempenho da antena. Para isso será necessário projetar uma Superfície Seletiva em Frequência (FSS), com a finalidade de melhorar os níveis de ganho da antena.

Figura 20 – Simulado  $S_{11}$  com variação na distância entre as fendas.



Fonte: Autor

Figura 21 – Diagrama de radiação da antena MIMO: (a) Polar; (b) 3D.



Fonte: Autor

Tabela 2 – Resultados obtidos do diagrama de radiação da antena MIMO.

<b>Parâmetro</b>	
Ganho	0,0931 dBi
Diretividade	2,376 dBi
Eficiência de radiação	-2,283 dB
Eficiência total	-3,031 dBi

A Tabela 3 apresenta o comparativo entre a antena de referência proposta por Brito (2021) e a antena MIMO proposta neste trabalho. Os parâmetros analisados são a frequência de ressonância, largura de banda, nível de reflexão  $S_{11}$  na ressonância e o ganho. Os resultados demonstram que a proposta de modificação da antena de referência diminuiu a largura de banda e o ganho, apesar de obter um melhor nível de reflexão. Isso demonstra que em relação aos valores de  $S_{11}$ , a antena MIMO proposta apresenta que uma pequena quantidade de sinal é refletida em relação à antena de referência.

Tabela 3 – Comparativo entre as antenas de referência e a MIMO proposta

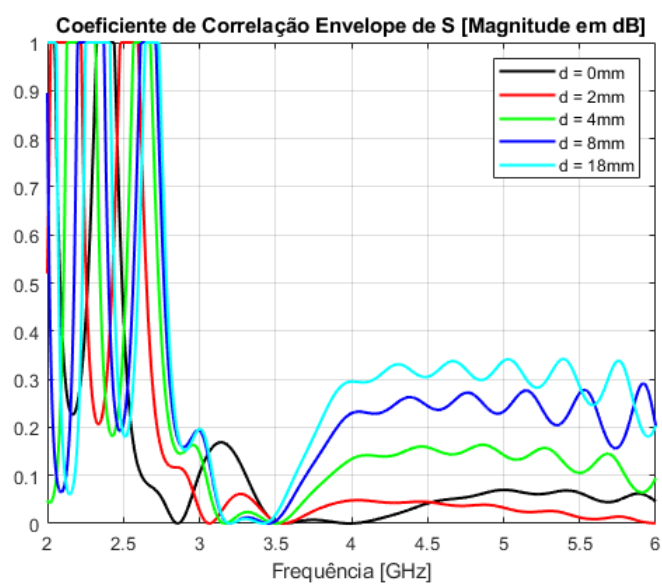
<b>Tipo da antena</b>	$f$ (GHz)	$BW$ (GHz)	$S_{11}$ (dB)	$Ganho$ (dBi)
Antena de referência	3,54	0,438	-14,1	3,21
Antena MIMO 2x2	3,55	0,384	-31,18	0,0931

### 3.2.1 Cálculo do Coeficiente de Correlação Envelope

Para avaliar o nível de interferência e conseqüentemente o desempenho da antena, levando em consideração a variação da distância entre as fendas, torna-se necessário realizar o cálculo do Coeficiente de Correlação Envelope (ECC). O coeficiente aponta que para valores menores que 0,1 na frequência de interesse (3,5 GHz), indica que os canais estão independentes e não correlacionados, o que representa um melhor desempenho do sistema MIMO. A Figura 22 mostra o ECC da antena em análise indica que a distância de 2 mm entre as fendas, apresenta de fato, o melhor resultado em comparação às demais configurações.



Figura 22 – Coeficiente de Correlação Envelope de S.



Fonte: Autor

## 4 Projeto da FSS

A finalidade de uso de uma FSS, conforme descrito na Seção 2.5, é melhorar as características de radiação da estrutura da antena de microfita. A aplicabilidade de estruturas periódicas têm contribuído para o desenvolvimento de tecnologias em projetos que visam melhorar a compatibilidade eletromagnética, podendo atuar na prevenção de interferência entre antenas, na análise da frequência ou resposta angular de uma antena, dentre outras.

A FSS foi projetada para operar na faixa de frequências entre 3 e 4 GHz, com uma frequência de ressonância desejada de 3,5 GHz. A geometria proposta é composta por uma espira anel circular tipo abertura. A escolha desta geometria baseou-se pela sua simplicidade, boa estabilidade angular comparada a outros elementos e a possibilidade de miniaturização, de acordo com Varkani, Firouzeh e Nezhad (2018). O material substrato escolhido foi o FR-4, com espessura de  $h = 1,60$  mm e permissividade relativa de  $\epsilon_r = 4,3$ . Uma vez conhecendo a frequência de ressonância desejada, torna-se necessário realizar o cálculo do comprimento de onda através da Equação 4.1 e do raio médio, conforme pode ser visto na Equação 4.2. Tais cálculos são importantes para o correto dimensionamento paramétrico da estrutura de modo que ela possa operar de forma efetiva na frequência estabelecida.

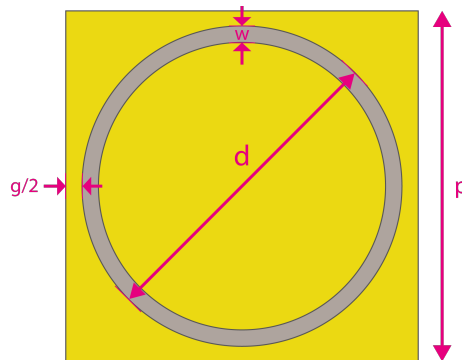
$$\lambda_{m\u00e9dio} = \frac{c}{f \times \sqrt{\epsilon_r}} \longrightarrow \lambda_{m\u00e9dio} = \frac{(3 \times 10^8)}{3,5 \times 10^9 \times \sqrt{4,3}} \approx 41,34mm \quad (4.1)$$

$$R_{m\u00e9dio} = \frac{\lambda_{m\u00e9dio}}{2\pi} \approx 6,58mm \quad (4.2)$$

A Figura 23 apresenta a ilustração da célula unitária do anel circular do tipo abertura e suas dimensões, onde:

- $w$ : largura da abertura (fenda);
- $p$ : tamanho da célula unitária (periodicidade);
- $d$ : diâmetro externo do círculo;
- $g$ : espaço mínimo entre o círculo em duas células unitárias adjacentes.

Figura 23 – Representação da célula unitária da FSS.



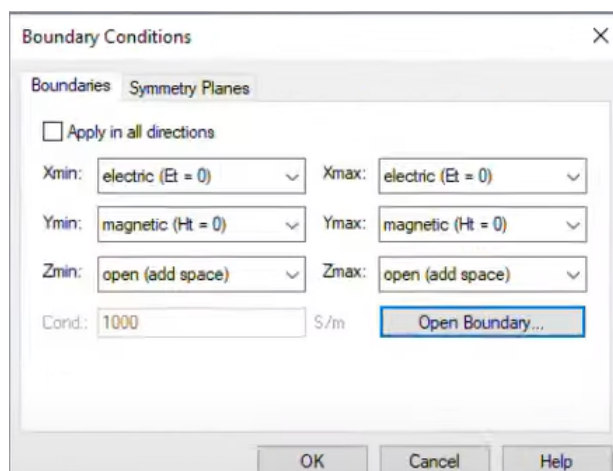
Fonte: Autor

A FSS com elementos do tipo abertura tem comportamento análogo a um filtro passa-faixa. Isso significa, portanto, que a medida em que os elementos vão entrando em ressonância, todo o conjunto vai se tornando transparente para a onda que incide na superfície, até que ocorra a transmissão total da onda na frequência de ressonância do conjunto. Como a estrutura da FSS atua como filtro, permitindo a transmissão de frequências previamente estabelecidas enquanto bloqueia as demais, as dimensões ideais que cumprem com os requisitos de projeto podem ser determinadas a partir de análise paramétrica do diagrama do coeficiente de transmissão,  $S_{21}$ . Após estruturar a célula unitária da FSS, deve-se determinar suas condições de contorno de modo a garantir que a simulação represente com precisão o comportamento da estrutura em relação às ondas eletromagnéticas incidentes.

A determinação das condições de contorno foram feitas observando os eixos  $x, y$  e  $z$ . As paredes elétricas ao longo do eixo  $x$  são empregadas para representar condições de impedância elétrica infinita. Isso significa que não há corrente elétrica atravessando essas paredes, refletindo efetivamente a energia eletromagnética de volta para a célula unitária. Isso é importante para garantir que a estrutura da FSS seja de fato seletiva em relação à frequência, pois impede a propagação de certas faixas de frequência através da estrutura. As paredes magnéticas ao longo do eixo  $y$  são utilizadas para simular condições de impedância magnética infinita. Isso impede a passagem de fluxo magnético através dessas paredes, garantindo que o campo magnético seja refletido de volta para a célula unitária. Essa condição é importante para garantir a seletividade em relação à polarização da onda eletromagnética incidente na estrutura. Por sua vez, a parede  $z$  aberta para o espaço significa que não há condições de contorno aplicadas nessa direção. Isso permite que a energia eletromagnética seja transmitida livremente na direção  $z$  e a célula unitária deve ter uma distância de pelo menos  $\frac{\lambda}{4}$  até o plano superior. Então para a definição das portas, onde a onda incide no plano superior da FSS, atinge a célula unitária onde parte da onda é refletida e outra parte será transmitida. Os itens analisados das condições de contorno em relação às suas paredes é mostrado na Figura 24 e célula unitária com as

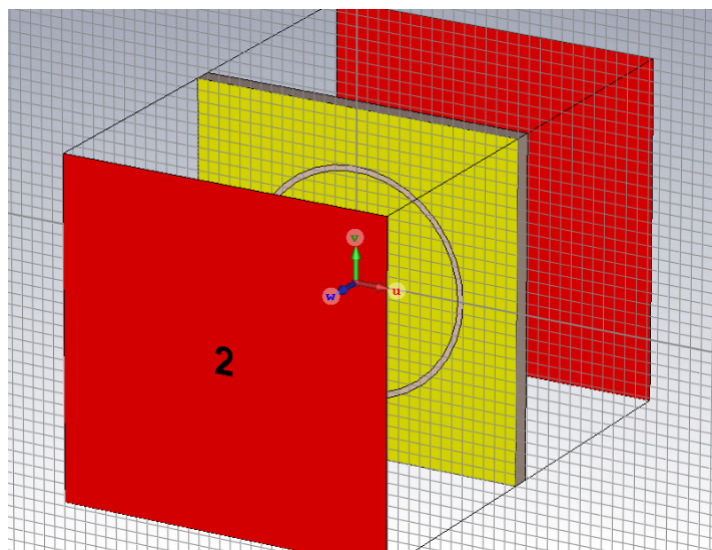
portas na direção do eixo  $z$ , mostrada na Figura 25.

Figura 24 – Condições de contorno da FSS.



Fonte: CST

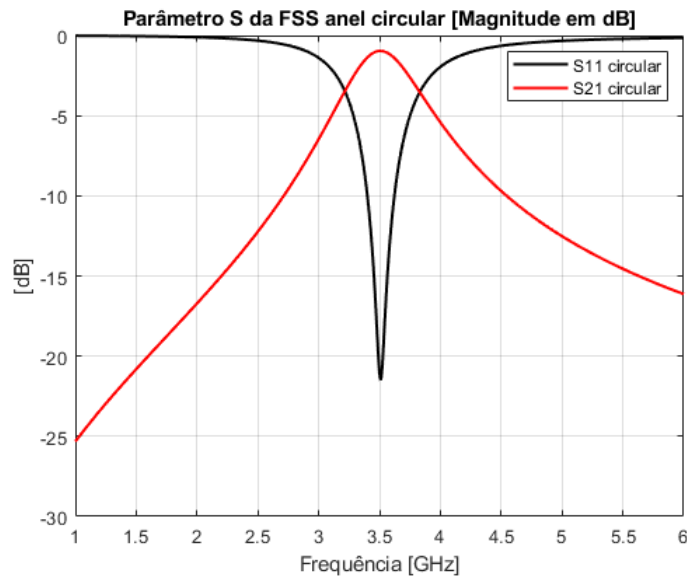
Figura 25 – Célula unitária da FSS com suas portas.



Fonte: CST

Os resultados obtidos através da simulação podem ser vistos na Tabela 4 e o coeficiente de transmissão poder ser observado na Figura 26.

Figura 26 – Parâmetros  $S_{11}$  e  $S_{21}$  obtidos através da simulação da célula unitária da FSS anel circular tipo abertura.



Fonte: Autor

Tabela 4 – Resultados dos testes realizados na construção da FSS anel circular.

Simulação	$w$ (mm)	$p$ (mm)	$d$ (mm)	$h$ (mm)	$f$ (GHz)	$S_{21}$ (dB)
1	0,5	30	9,5	1,60	3,61	-28,99
2	0,3	30	9,5	1,60	3,56	-35,22
3	0,2	30	9,5	1,25	3,54	-35,94
4	0,3	30	9,5	1,25	3,56	-22,55
5	0,5	30	10	1,60	3,50	-0,966

Fonte: Autor.

De acordo com os resultados obtidos através da simulação da FSS, pode-se concluir que a Simulação 5 apresentou resultados mais próximos da frequência especificada de projeto. Nota-se também que o nível do parâmetro de transmissão,  $S_{21}$ , quanto mais próximo de zero, indica que há uma melhor eficiência de transmissão. Isso sugere que uma quantidade maior de potência incidente é transferida para a carga sem perdas significativas.

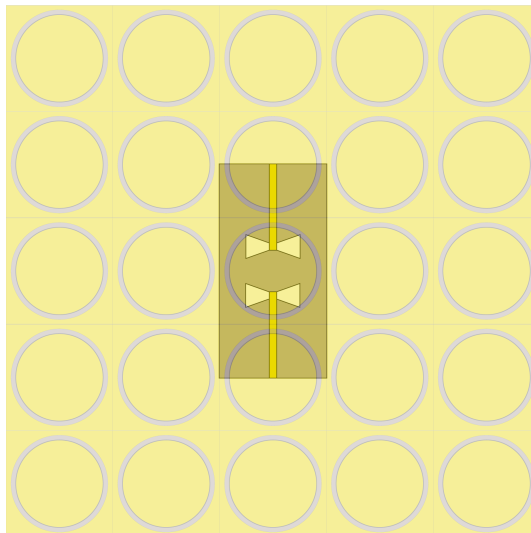
Assim sendo, a maneira de observar a viabilidade e efetividade da FSS pode ser vista integrando-a à antena de microfita. A análise do conjunto fornece informações importantes a respeito do desempenho da estrutura, podendo indicar pontos de ajustes no projeto.

## 5 Antena Planar de Microfita MIMO 2x2 integrada à FSS

A introdução da tecnologia 5G representa uma revolução no panorama das telecomunicações, destacando-se não apenas pela sua velocidade de transmissão de dados, mas também pela capacidade de suportar uma gama diversificada de aplicações, desde comunicações em tempo real até a Internet das Coisas (IoT) e veículos autônomos. Neste cenário, a otimização de dispositivos de comunicação torna-se evidente para atender às demandas crescentes por largura de banda e confiabilidade.

No âmbito deste trabalho, concentrou-se na integração entre a antena de microfita MIMO com fenda bow-tie no plano terra e a estrutura de superfície seletiva em frequência (FSS) do tipo abertura, conforme pode ser visualizado na Figura 27. Essa integração assume uma grande importância, considerando a necessidade de aprimorar o desempenho das antenas em sistemas 5G. A eficiência da comunicação sem fio, a minimização de interferências e a maximização da largura de banda são metas fundamentais nesse contexto.

Figura 27 – Representação da antena de microfita integrada à FSS.

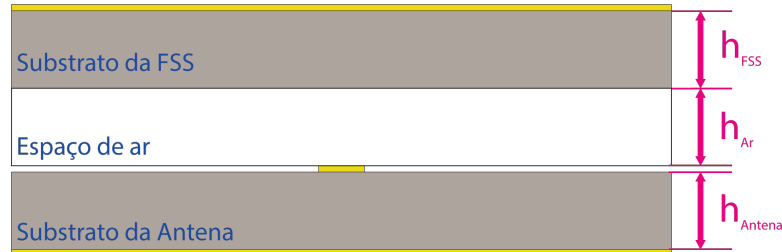


Fonte: Autor

Inicialmente a configuração com o uso da FSS é apresentada na Figura 28, onde  $h_{FSS}$  representa a espessura do substrato da FSS,  $h_{Ar}$  corresponde a altura da camada de ar e  $h_{Antena}$  retrata a espessura do substrato da antena de microfita. Conforme observado no Capítulo 4, foram feitas variações na espessura da FSS a fim de se obter uma frequência de transmissão próxima de 3,5 GHz. Assim também, o mesmo procedimento foi utilizado com a camada de ar do conjunto, a fim de se obter um resultado satisfatório a nível de

frequência, ganho e diretividade. A Tabela 5 apresenta os resultados obtidos através da variação de altura da camada de ar.

Figura 28 – Vista de perfil do conjunto antena e FSS



Fonte: Autor

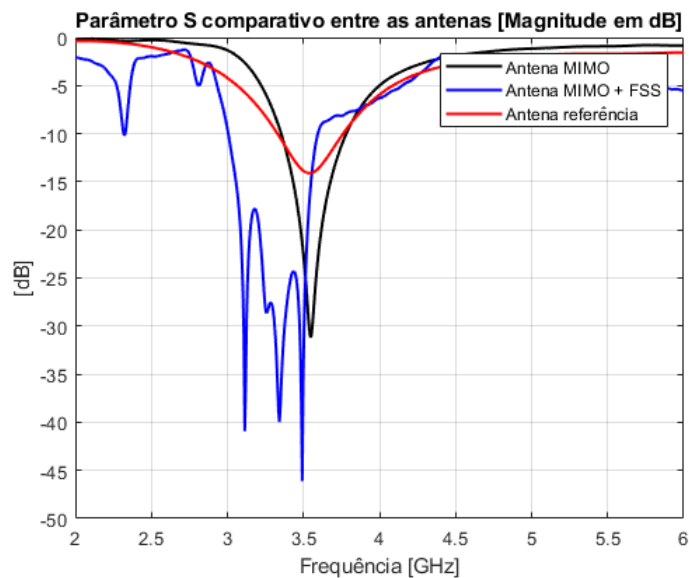
Tabela 5 – Resultados dos testes realizados da simulação do conjunto antena e FSS variando a altura da camada de ar.

Simulação	$h_{Ar}$ (mm)	$f$ (GHz)	$S_{11}$ (dB)	Ganho (dBi)	BW (GHz)
1	1,25	3,204	-19,168	-1,319	0,231
2	1,57	3,240	-18,385	-1,084	0,223
3	3,14	3,318	-16,538	-0,462	0,205
4	4,71	3,354	-15,781	-0,163	0,195
5	14,00	3,492	-46,111	13,62	0,588

Fonte: Autor.

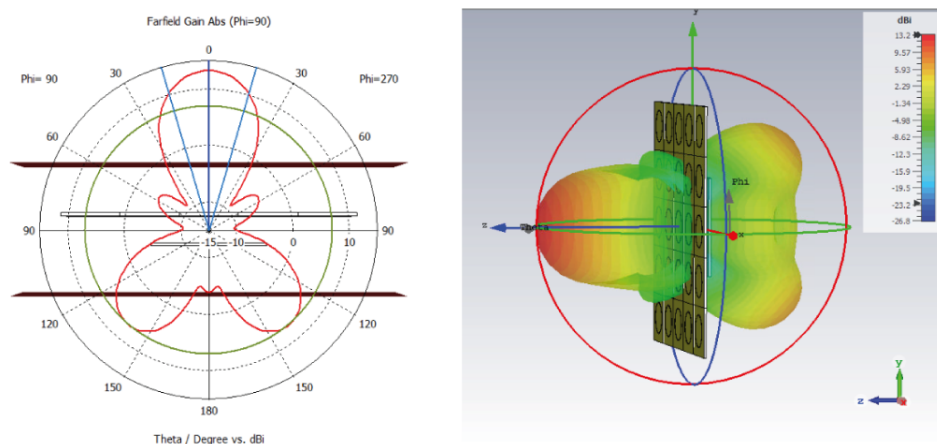
Em princípio, considerou-se a altura da camada de ar sendo igual à espessura do substrato da FSS. Nas simulações seguintes a altura da camada de ar foi variando proporcionalmente à espessura do substrato da antena de microfita. Por fim, foi feita simulação onde a altura da camada de ar fosse próxima de  $\frac{\lambda}{3}$  (Equação 4.1). Esta relação refere-se à distância ótima entre a antena de microfita e a FSS para obtenção de um desempenho eficaz. Dessa forma, através dos resultados da Tabela 5 é possível observar que o melhor resultado foi obtido com a camada de ar com altura de 14 mm, onde o conjunto se comportou de modo a se aproximar da frequência de projeto. O ganho de 13,62 dBi indica que a antena é eficiente e otimiza o sinal que recebe, amplificando-o. A Figura 29 apresenta um comparativo entre os resultados obtidos, a nível de parâmetro de reflexão, da antena de microfita MIMO 2x2 e do conjunto antena e FSS. A Figura 30 mostra o diagrama de radiação obtido através da simulação.

Figura 29 – Comparativo dos níveis de reflexão ( $S_{11}$ ) da antena MIMO, do conjunto antena MIMO + FSS e antena de referência.



Fonte: Autor

Figura 30 – Diagrama de radiação do conjunto antena e FSS: (a) Polar; (b) 3D



Fonte: Autor

Através da Figura 29 pode-se confirmar que houve um aperfeiçoamento nos níveis de largura de banda e reflexão do conjunto em relação à antena MIMO, que é uma medida da eficiência do casamento de impedância da antena. Este comportamento pode ser observado através do diagrama de radiação do conjunto. Com a FSS projetada para atuar como um filtro passa-faixa, permitindo seletivamente frequências próximas a 3,5 GHz, melhorou a seletividade da antena de microfita nesta faixa de frequência, aperfeiçoando de forma significativa o nível de ganho do projeto. O uso da FSS no projeto tornou a antena mais diretiva, melhorando assim sua capacidade de focar o sinal em uma determinada área e direção. A Tabela 6 apresenta os resultados obtidos com as antenas de referência, MIMO



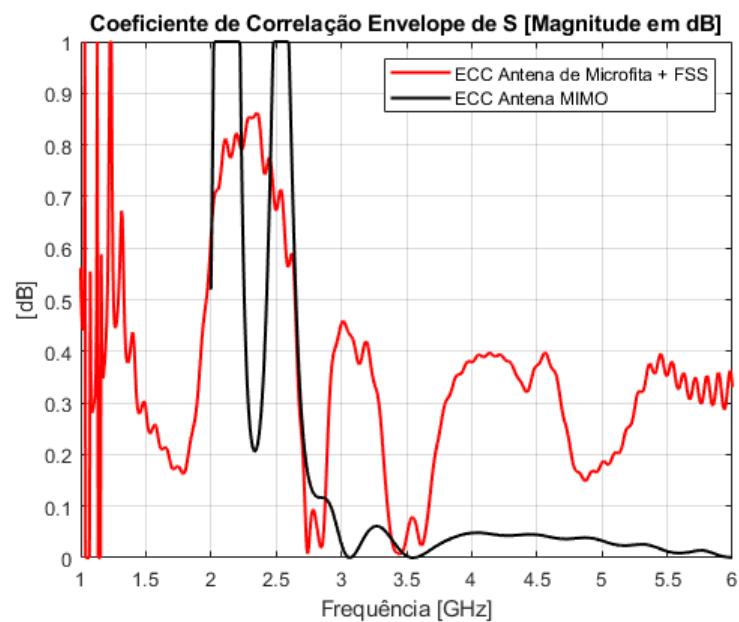
e antena MIMO integrada à FSS.

Tabela 6 – Comparativo entre as antenas de referência, MIMO e antena MIMO integrada à FSS

<b>Tipo da antena</b>	$f$ (GHz)	$BW$ (GHz)	$S_{11}$ (dB)	$Ganho$ (dBi)
Antena de referência	3,54	0,438	-14,10	3,21
Antena MIMO 2x2	3,55	0,384	-31,18	0,0931
Antena MIMO + FSS	3,50	0,588	-46,11	13,62

A Figura 31 apresenta o comparativo entre o coeficiente de correlação envelope (ECC) da antena MIMO proposta neste trabalho e o conjunto integrado da antena MIMO com a FSS. Nesta configuração, a FSS torna-se um elemento a mais no conjunto, porém este elemento não interfere de forma significativa entre os sinais recebidos pela antena, mantendo assim, os canais independentes e não correlacionados, representando um desempenho eficiente da estrutura.

Figura 31 – Comparativo do ECC da antena MIMO e conjunto antena MIMO + FSS



Fonte: Autor

## 6 Considerações finais

Com a crescente demanda por largura de banda e confiabilidade, tornou-se necessário desenvolver a integralização de estruturas de diferentes antenas nos dispositivos. As antenas de microfita do tipo MIMO representam um sistema capaz de aumentar a capacidade de transmissão sem aumentar a largura de banda disponível, sendo grande objeto de estudo na área de telecomunicações recentemente. Apesar de apresentarem bons níveis de reflexão, as antenas de microfita do tipo MIMO exibem baixo ganho, sendo necessário integra-la a uma FSS. As FSS atuam como um filtro seletivo em frequência, permitindo a passagem de determinadas frequências enquanto bloqueia outras. Isso pode ajudar a reduzir a interferência de sinais de frequências indesejadas, possibilitando um aumento a nível de reflexão, transmissão, ganho, largura de banda e diretividade.

Neste trabalho estabeleceu-se como objetivo, projetar uma antena planar de microfita, transformando-a em uma antena do tipo MIMO. A antena proposta foi uma antena MIMO 2x2 com fenda bow-tie no plano terra. Para a FSS, foi projetada uma geometria de anel circular do tipo abertura, de modo a rejeitar frequências fora do espectro de ressonância de 3,5 GHz. Através das simulações, foram alcançados e analisados os resultados de níveis de reflexão para a antena, transmissão para a FSS, ganho e largura de banda, para a antena e o conjunto antena e FSS.

De acordo com os resultados obtidos, utilizando o *software* CST STUDIO SUITE, através de acesso remoto ao Laboratório de Circuitos Integrados da Universidade Federal de Itajubá (Unifei), *campus* Itabira, a antena MIMO proposta demonstrou um comportamento desejável para nível de reflexão ( $S_{11}$ ), apresentando desafios significativos em relação ao ganho e largura de banda, quando comparado à antena de referência, observando a necessidade de integralizar a antena a uma superfície que seletivamente controlasse a frequência da onda incidente na antena. A análise paramétrica permitiu identificar as configurações ideais para os parâmetros da antena e da FSS, contribuindo para um melhor desempenho geral do conjunto. A geometria escolhida para a FSS é composta por uma espira anel circular tipo abertura, que exibe boa estabilidade angular em comparação a outras geometrias. A integração da antena com a FSS trouxe como objetivo principal a ampliação da largura de banda e melhoria do ganho da estrutura, tornando-a adequada para aplicações em sistemas de comunicação sem fio 5G. Os resultados obtidos das simulações foram promissores, demonstrando que a antena proposta tornou-se viável para operar na faixa de frequência de 3,5 GHz, exibindo excelentes resultados a nível de ganho, largura de banda e diretividade.

## 6.1 Trabalhos Futuros

Considerando os resultados alcançados neste trabalho e as limitações identificadas, algumas linhas de pesquisa e trabalhos futuros podem ser explorados:

- A validação experimental é fundamental para confirmar a viabilidade e o desempenho da antena MIMO integrada à FSS anel circular. Realizar testes em laboratório e em ambiente real de operação permitirá a comparação dos resultados simulados com os dados reais, proporcionando maior confiabilidade ao projeto.
- Explorar outras configurações de FSS, incluindo diferentes formas e parâmetros, pode ser uma abordagem interessante para otimizar ainda mais o desempenho da antena MIMO. O uso de técnicas de otimização para ajustar os parâmetros da FSS pode resultar em melhorias significativas na largura de banda, ganho e diretividade.
- Investigar o desempenho da antena MIMO integrada à FSS para sistemas com mais elementos, como MIMO 4x4 ou 8x8, por exemplo. Isso pode ampliar a capacidade de transmissão e recepção do sistema. Essa expansão é relevante para grande capacidade de dados.

# Referências

- ANDRADE, B. Oliveira de. *Estudo de Arranjos de Antenas de Microfita com Patch Quase-fractal para Comunicações Sem Fio*. 72 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN, 2014. 1
- BALANIS, C. A. *Teoria de Antenas – Análise e Síntese*. [S.l.]: LTC, 2009. 5, 6, 15
- BLANCH, S.; ROMEU, J.; CORBELLA, I. Exact representation of antenna system diversity performance from input parameter description. *Institution of Engineering and Technology (IET)*, v. 39, p. 705–707, 2003. 9
- BRITO, A. C. R. de. *Antena bow-tie integrada a uma FSS refletora para aplicações em sistemas 5G*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação,, Natal, RN, 2021. 9, 14, 15, 16, 17, 21
- CAMPOS, A. L. P. de S. *Superfícies Seletivas em Frequência – Análise e Projeto*. [S.l.]: IFRN Editora, 2008. 1, 9, 12
- COLLIN, R. E. *Foundations for Microwave Engineering*. [S.l.]: John Wiley & Sons, Inc., 1992. 7
- FIGUEIREDO, F. A. P. de. An Overview of Massive MIMO for 5G and 6G. *IEEE Latin America Transactions*, v. 20, n. 6, p. 1–10, 2022. 5
- FOUDAZI, A.; MALLAHZADEH, A.; NEZHAD, S. M. A. A triple-band WLAN/WiMAX printed monopole antenna for MIMO applications. *Wiley Periodicals*, p. 1–6, 2012. 8
- GOBJUKA, H. 4G Wireless Networks: Opportunities and Challenges. *arXiv*, p. 1–6, 2009. 4
- HALONEN, T.; ROMERO, J.; MELERO, J. *GSM, GPRS and Edge Performance: Evolution Towards 3G/UMTS*. [S.l.]: John Wiley & Sons, Inc., 2013. 3
- HUANG, J.; WU, T. K.; LEE, S. W. Tri-band frequency selective surface with circular ring elements. *IEEE*, v. 1, n. 1, p. 1–2, 1994. 12
- KHAN, I. et al. Designed Circularly Polarized Two-Port Microstrip MIMO Antenna for WLAN Applications. *MDPI*, v. 17, n. 3, p. 17, 2022. 14
- KHARCHE, S. et al. Wide band circularly polarised diversity antenna for satellite and mobilecommunication. In: . [S.l.: s.n.], 2017. p. 7. 14
- KIANI, G. I. *Passive, Active and Absorbing Frequency Selective Surfaces for Wireless Communication Applications*. 148 p. — Macquarie University, 2009. 10, 11
- LE, T. T.; TRAN, H. H.; PARK, H. C. Simple-Structured Dual-Slot Broadband Circularly Polarized Antenna. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, v. 17, n. 3, p. 476–479, 2018. 14

- LEE, J. et al. LTE-advanced in 3GPP Rel -13/14: an evolution toward 5G. *IEEE Communications Magazine*, v. 54, p. 7, 2016. 4
- MITTRA, R.; CHAN, C. H.; CWIK, T. Techniques for Analyzing Frequency Selective Surfaces-A Review . *IEEE*, v. 1, n. 1, p. 1–2, 1988. 1, 9
- MOURA, L. C. M. de. *Caracterização de FSS com Geometria Estrela de Quatro Braços Tipo Fenda*. 99 p. Dissertação (Mestrado) — Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, 2015. 9, 12
- MUNK, B. A. *Frequency Selective Surfaces - Theory and Design*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2000. 10
- NETWORLD2020, E. et al. 5g: Challenges, research priorities, and recommendations. *Joint White Paper*, September 2014. 5
- ORFANIDIS, S. J. *Electromagnetic Waves and Antenas*. [S.l.]: ECE Department, Rutgers University, 2016. 7
- PINHEIRO, B. de M. *Projeto de antenas multifuncionais integradas com superfícies seletivas em frequência*. 65 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN, 2016. 1, 10, 12, 13
- POZAR, D. M. *Microwave Engineering*. [S.l.]: John Wiley & Sons, Inc., 2011. 7
- ROBERTS, M. L. et al. Evolution of the air interface of cellular communications systems toward 4G realization. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, v. 8, p. 35, 2006. 3, 4
- ROMEU, J.; RAHMAT-SAMII, Y. Dual band FSS with fractal elements. *IEEE*, v. 1, n. 1, p. 1–4, 1988. 12
- VARKANI, A. R.; FIROUZEH, Z. H.; NEZHAD, A. Z. Equivalent circuit model for array of circular loop FSS structures at oblique angles of incidence. *IET Microwaves, Antennas Propagation*, v. 39, p. 1–7, 2018. 23
- WARREN, D.; DEWAR, C. Understanding 5G: Perspectives on future technological advancements in mobile. *GSMA Intelligence*, 2014. Acesso em: 31/07/2023. Disponível em: <<https://www.gsma.com/futurenetworks/wp-content/uploads/2015/01/2014-12-08-c88a32b3c59a11944a9c4e544fee7770.pdf>>. 5