

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA

ENGENHARIA ELETRÔNICA E DE TELECOMUNICAÇÕES

CAMPUS PATOS DE MINAS

PRISCILA REIS BORGES

**ARRANJO DE ANTENAS MIMO APLICADO À
5ª GERAÇÃO DE REDES MÓVEIS**

Patos de Minas - MG

Agosto/2022

PRISCILA REIS BORGES

**ARRANJO DE ANTENAS MIMO APLICADO
À 5ª GERAÇÃO DE REDES MÓVEIS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Faculdade de Elétrica de Uberlândia, da
Universidade Federal de Uberlândia, como pré-
requisito para graduação em Engenharia
Elétrica de Telecomunicações

Orientador: Prof. Dr^a. Karine Barbosa
Carbonaro

Patos de Minas - MG

Agosto/2022

PRISCILA REIS BORGES

**ARRANJO DE ANTENAS MIMO APLICADO
À 5ª GERAÇÃO DE REDES MÓVEIS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Faculdade de Elétrica de Uberlândia, da
Universidade Federal de Uberlândia, como pré-
requisito para graduação em Engenharia
Elétrica de Telecomunicações

Orientador: Prof. Dr^a. Karine Barbosa
Carbonaro

Aprovado em 16 de agosto de 2022.

Banca Examinadora

Profa. Dra. Karine Barbosa Carbonaro – FEELT/UFU (Orientadora)

Prof. Dr. André Luiz Aguiar da Costa – FEELT/UFU (Membro 1)

Prof. Dr. Renan Alves dos Santos – FEELT/UFU (Membro 2)

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus por ter me dado saúde e força para enfrentar os desafios que me deparei ao longo da minha vida e ter me proporcionado chegar até aqui.

Aos meus pais, Alaerdes Borges Filho e Zélia Maria Reis Borges, à minha irmã Rívia por todo apoio, amor, carinho, incentivo e por sempre estarem presentes. Amo muito vocês!

Ao meu namorado/noivo Gabriel, por estar sempre ao meu lado, me apoiando, incentivando e tendo paciência comigo nos momentos difíceis da minha graduação. Te amo!

Aos meus familiares que sempre apostaram no meu potencial e me incentivaram.

Aos meus amigos, em especial meus amigos Débora Amorim, Viviani Dias e Yan Ribeiro por me acompanharem durante essa jornada, que me ajudaram e proporcionaram momentos de descontração e reflexão, fazendo desse período uma experiência de vida acadêmica e social mais agradável e prazerosa.

À minha orientadora Dra. Karine Carbonaro, pela amizade que construímos, por toda ajuda no desenvolvimento deste trabalho e pelos ensinamentos passados durante a graduação.

Aos meus professores, por todo aprendizado durante esse período importante da minha formação.

À Universidade Federal de Uberlândia Campus Patos de Minas, pela oportunidade de conquistar minha graduação nesta instituição conceituada.

E a todos que contribuíram direta ou indiretamente durante minha trajetória acadêmica. Meus sinceros agradecimentos a todos.

RESUMO

Com a crescente popularização da tecnologia e o aumento da necessidade de conexão entre pessoas e “coisas”, criar maneiras de melhorar as comunicações móveis tem-se tornado ponto de diversas pesquisas na área. Com base nessa evolução e necessidade de aprimorar a experiência dos usuários no ambiente tecnológico, surgiu a quinta geração de tecnologia móvel, conhecida popularmente como 5G, que possui o intuito de proporcionar o aumento da capacidade de transmissão, melhora no ganho, redução do tempo de resposta do sistema das redes de comunicações. Contudo, a existência de interferências e atenuações no sistema, precisam cada vez mais ser minimizadas. Para isso, tem-se estudado métodos como a utilização de múltiplas entradas e múltiplas saídas (MIMO), que auxiliam na melhora do ganho, largura de banda e por consequência na capacidade de canal. Um exemplo de aplicação dessa técnica se dá por meio do uso de arranjo de antenas retangulares de microfita, que por serem de baixo custo e de fácil construção, torna sua reprodução mais acessível. Neste contexto, esse trabalho visa demonstrar a importância da utilização dessa técnica para a tecnologia móvel de quinta geração, no quesito de melhora de performance, quando comparado à utilização de antenas simples. Assim, espera-se que este trabalho tenha contribuições significativas que possam ser implementadas em prol da expansão das comunicações móveis.

Palavras-chave: quinta geração (5G), arranjo de antenas de microfita retangular, capacidade de transmissão, MIMO

ABSTRACT

With the growing popularization of technology and the increased need for connection between people and "things," creating ways to improve mobile communications has become a point of various research in the area. Based on this evolution and the need to improve users' experience in the technological environment, the fifth generation of mobile technology emerged, popularly known as 5G, which aims to increase transmission capacity, improve gain, reduce communications network system response. However, the existence of interference and attenuation in the system increasingly needs to be minimized. For this, methods have been studied such as the use of multiple input and multiple output antennas (MIMO), which help improve the gain, bandwidth and, consequently, the channel capacity of the antennas. An example of the application of this technique is through the use of rectangular microstrip antennas, which are low cost and easy to build, making their reproduction more accessible. In this context, this work aims to demonstrate the importance of using this technique for the fifth generation mobile technology, in terms of performance improvement, when compared to the use of simple antennas. Thus, it is expected that this work has significant contributions that can be implemented in favor of the expansion of mobile communications.

Keywords: fifth generation (5G), rectangular microstrip, antenna array, transmission capacity, MIMO

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Previsão do crescimento global de assinantes móveis até 2023.	16
Figura 2 - Cronograma da padronização 5G.	19
Figura 3 -Cronograma da padronização 5G a partir do Release 17.	20
Figura 4 – Cenários que irão compor as redes 5G no Brasil.	20
Figura 5 - Modelo do sistema SISO.	24
Figura 6 - Capacidade do SISO.	25
Figura 7 - BER do SISO.	25
Figura 8 - Modelo do sistema MISO.	26
Figura 9 - Capacidade do MISO (2 x 1).	27
Figura 10 - BER do MISO (2 x 1).	27
Figura 11 - Modelo do sistema SIMO.	28
Figura 12 - Capacidade do SIMO (1 x 2).	29
Figura 13 - BER do SIMO (1 x 2).	29
Figura 14 - Modelo do sistema MIMO.	30
Figura 15 - Capacidade do MIMO (2 x 2).	31
Figura 16 - BER do MIMO (2 x 2).	32
Figura 17 - Tipos de multiplexação espacial.	35
Figura 18 - Comparação entre sistema tradicional e sistema MIMO massivo.	37
Figura 19 - Arranjo linear uniforme com alimentação em paralelo.	40
Figura 20 - Formatos utilizados para <i>patch</i>	41
Figura 21 - Configuração genérica de uma antena de microfita.	42
Figura 22 - Configuração genérica de uma linha de microfita.	44
Figura 23 - Antena de microfita com acréscimo de <i>inset feed</i>	46
Figura 24 - Configurações de alimentação para conjuntos de plaquetas de microfita.	48
Figura 25 - Configuração do circuito de alimentação por arranjo de linhas afiladas.	49
Figura 26 - Antena de microfita da proposta I.	52
Figura 27 - Antena de microfita da proposta II.	52
Figura 28 - Antena de microfita da proposta III.	53
Figura 29 - Antena de microfita da proposta IV.	53
Figura 34 - Parâmetros avaliativo $S_{1,1}$ e $S_{2,1}$ da Proposta II.	60
Figura 35 - Diagrama de radiação 3D da Proposta II.	60
Figura 36 - Parâmetros avaliativo $S_{1,1}$, $S_{2,1}$, $S_{3,1}$ e $S_{4,1}$ da Proposta III.	61
Figura 38 - Parâmetros avaliativo $S_{1,1}$ e $S_{2,1}$ da Proposta IV.	62

Quadro 1 – Especificações para os cenários do 5G.....	22
Quadro 2 -Aplicações MIMO em comunicações móveis.	37
Quadro 3 -Parâmetros do material.	50
Quadro 4 -Parâmetros de alimentação e <i>inset-feed</i>	51
Quadro 5 - Parâmetros para uma antena de microfita.	51
Quadro 6- Esquema de classificação modificado para dispositivos/sinais com base na largura de banda.	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Capacidade de canal (SISO, MISO, SIMO, MIMO).	32
Tabela 2 -Taxa de erro de bits (SISO, MISO, SIMO, MIMO).	33
Tabela 3 -Resultados obtidos do diagrama de radiação da Proposta I.	59
Tabela 4-Resultados obtidos do diagrama de radiação da Proposta II.	60
Tabela 5-Resultados obtidos do diagrama de radiação da Proposta III.....	61
Tabela 6-Resultados obtidos do diagrama de radiação da Proposta IV.	63
Tabela 7-Resultados obtidos do diagrama de radiação da Proposta V.....	64
Tabela 8-Análise comparativa dos resultados para Propostas I, II e III.	66
Tabela 9-Análise comparativa dos resultados para Propostas II e IV.	66
Tabela 10-Análise comparativa dos resultados para Propostas III e V.....	67

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANATEL - Agência Nacional de Telecomunicações

ABES - Associação Brasileira das Empresas de Software

IDC - Brasil International Data

TI - Tecnologia da Informação

ABRINTEL - Associação Brasileira de Infraestrutura para Telecomunicações

MIMO - *Multiple Input Mutiple Output*

3GPP - *Third Generation Partnership Project*

BER - *Bit Error Rate*

BTS - *Base Transceiver Station*

CSI - *Channel State Information*

DPC - *Dirty Paper Coding*

ERB - Estação Rádio Base

IoT - *Internet of Things*

ITU - *International Telcommunication Union*

LTE - *Long Term Evolution*

MISO - *Multiple Input Single Output*

ML - *Maximum Likelihood*

MU – MIMO - *Multiple User – MIMO*

SU – MIMO - *Single User - MIMO*

NR - *New Radio*

SIMO - *Single Input Multiple Output*

SISO - *Single Input Single Output*

SNR - *Signal to Noise Ratio*

ULA - *Uniform Linear Array*

URLLC - *Ultra Reliable and Low Latency Communication*

t - Espessura do condutor

λ_0 - Comprimento de onda no espaço livre

h - Altura do substrato

f_c - Frequência de operação

ϵ_r – Constante dielétrica relativa do substrato
 ϵ_{eff} – Permissividade relativa efetiva do substrato
 W – Largura da antena
 L - Comprimento da antena
 L_{eff} – Comprimento efetivo
 w_f – Largura da linha
 Z_0 – Impedância de entrada
 l_f – Comprimento da linha
 R_{in} – Resistência de entrada
 In_L – Comprimento do inset
 G_1 – Condutância
 G_{12} – Condutância mútua
 k_0 – Número de onda no espaço livre
 J_0 – Função de Bessel de primeira espécie e ordem zero
 In_w – Largura do inset
 r – Distância entre as antenas
 S – Parâmetro de espalhamento
 Γ – Coeficiente de reflexão
 RL_i – Perda de retorno
 f_1 – Frequência inferior
 f_2 – Frequência superior
 BW – Largura de banda
 $LFMP$ – Largura de feixe de meia potência
 $LFEN$ – Largura de feixe entre nulos
 U – Intensidade de radiação
 P_{rad} -Potência radiada
 D - Diretividade
 P_{in} – Potência de entrada

Sumário

AGRADECIMENTOS.....	4
RESUMO	5
ABSTRACT	6
LISTA DE ILUSTRAÇÕES.....	7
LISTA DE TABELAS.....	9
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	10
INTRODUÇÃO	14
1.1 Tema do Projeto	15
1.2 Problematização	15
1.3 Objetivos	16
1.3.1 Objetivos Gerais.....	16
1.3.2 Objetivo Específico	16
1.4 Justificativa	16
1.5 Organização do trabalho.....	17
REFERENCIAL TEÓRICO	18
2.1 QUINTA GERAÇÃO	18
2.1.1 Padronização das redes móveis	18
2.1.2 Cenários.....	20
2.1.3 Cenário atual no Brasil	22
2.2 CAPACIDADE DO CANAL.....	23
2.2.1 Capacidade de Sistemas de múltiplas antenas.....	23
2.3 ANTENAS MIMO	33
2.3.1 Características	33
2.3.2 Vantagens	34
2.3.3 Desvantagens.....	36
2.3.4 MIMO Massivo	36
2.3.5 Aplicações em comunicações móveis	37
2.4 SISTEMAS DE MÚLTIPLAS ANTENAS	38
2.4.1 Arranjos de antenas	38
2.5 ANTENAS DE MICROFITA	41
MATERIAIS E MÉTODOS.....	42
3.1 Dimensionamento da base da antena de microfita	42
3.2 Métodos de alimentação	44
3.3 Dimensionamento do <i>Inset feed</i>	46

3.4 Arranjo	48
3.5 Desenvolvimento das antenas de microfita no simulador	49
3.6 Definição das métricas avaliativas	54
3.6.1 Espalhamento	54
3.6.2 Coeficiente de Reflexão	54
3.6.3 Perda de retorno	55
3.6.4 Largura de Banda	55
3.6.5 Diagrama de radiação.....	56
3.6.6 Largura de feixe	56
3.6.7 Diretividade.....	57
3.6.8 Ganho	57
DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	58
4.1 Resultados da Proposta I	58
4.2 Resultados da Proposta II.....	59
4.3 Resultados da Proposta III.....	60
4.4 Resultados da Proposta IV	62
4.5 Resultados da Proposta V	63
4.4 Análise Comparativa dos Resultados das Propostas I, II, III, IV e V	64
4.5 Análise Comparativa das Antenas no Sistema MIMO.....	65
4.6 Análise Comparativa das Antenas no Sistema MIMO e dos Arranjos MIMO	66
CONSIDERAÇÕES FINAIS	68
5.1 Conclusões	68
5.2 Trabalhos Futuros.....	69
REFERÊNCIAS	70

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

Neste Capítulo são delimitados os objetivos específicos do estudo proposto nesse trabalho de conclusão de curso de acordo com a justificativa apresentada. Além disso, apresenta-se a metodologia utilizada para o desenvolvimento da pesquisa visando o cumprimento do objetivo principal.

De acordo com o balanço de acesso aos serviços de telecomunicações de 2021 publicado pela Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL), houve um crescimento de 14% no número de assinantes de banda larga fixa em relação aos anos anteriores. Também, nesse balanço, verificou-se um aumento na base de assinantes da telefonia móvel, cerca de 8,2% comparado aos números ao final de 2020 [1]. Este crescimento é um dos resultados da pandemia, uma vez que, a internet tornou-se um item essencial no dia a dia das pessoas, pois o estilo *home office* foi adotado para trabalhar, estudar, realizar reuniões e compras *online* [2].

Segundo a Associação Brasileira das Empresas de *Software* (ABES) estima-se um crescimento de 14,3% nos investimentos na área de tecnologia da informação no Brasil em 2022 [3]. Conforme, Denis Arcieri, *country manager da Brasil International Data* (IDC) Brasil, acredita-se que o crescimento em TI deve ser conduzido pelo comportamento do segmento de dispositivos, enquanto o de Telecomunicações será impulsionado pelo avanço das redes móveis e as perspectivas sobre os impactos do 5G [4].

Com base no edital, da ANATEL, a respeito do leilão do 5G previa-se que as operadoras começassem oferecer a tecnologia nas capitais do país até dia 31 de julho. Porém, foi aprovado o pedido de prazo adicional de 60 dias, tendo agora como data limite 28 de setembro. O calendário de implantação total do 5G para as demais cidades brasileiras, se estenderá até 2029 [5].

As principais dificuldades para a implementação dessa tecnologia são as restrições de regulamentação das leis municipais. Isso porque a maioria utiliza parâmetros urbanísticos antigos, onde se equipara as infraestruturas de telecomunicações a edificações e não a

equipamentos urbanos [5]. Entretanto, a atualização é fundamental para permitir a implantação das antenas de pequeno porte, que serão responsáveis pelo adensamento da cobertura. Com a ausência dessas novas antenas, inseridas basicamente em estruturas pré-existentes, a cobertura do 5G pode apresentar falta de continuidade ou não alcançar altas velocidades e baixas latências que a tecnologia pode proporcionar, segundo Luciano Stutz, presidente da Associação Brasileira de Infraestrutura para Telecomunicações (ABRINTEL) [5].

Sabendo que as redes 5G podem fornecer uma experiência de uso dez vezes melhor em relação as gerações anteriores, é importante atentar que por consequência isso fará aumentar rapidamente o número de usuários e o tráfego [6]. Por isso, o vice-presidente de produtos 5G da Huawei, sugere que as operadoras ofertem mais largura de banda e utilizem o *Massive MIMO* (*Multiple Input Multiple Output*). Segundo ele, essa tecnologia é a base para alcançar o melhor desempenho e a resposta das operadoras para obterem redes 5G de alta qualidade [6].

1.1 Tema do Projeto

Nesse trabalho é realizado um estudo comparativo de um sistema de arranjo de antenas de microfita no sistema MIMO para ser utilizado nas aplicações de rede móveis 5G.

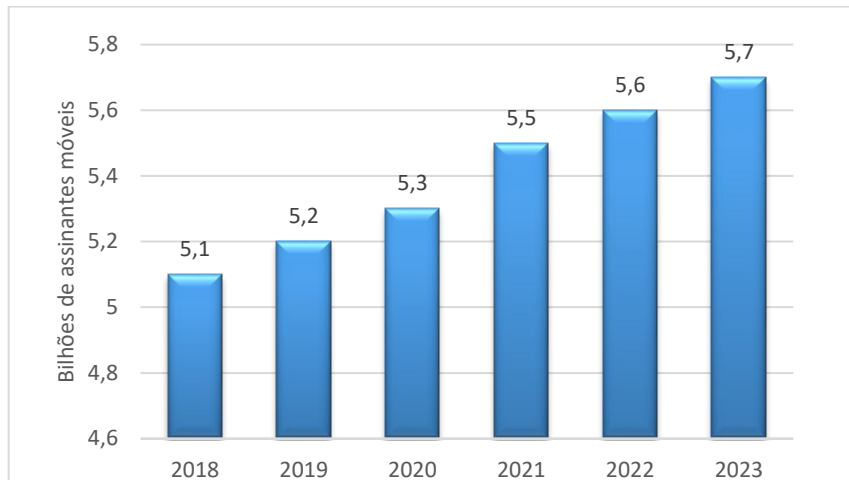
1.2 Problematização

Ao analisar o impacto da pandemia na sociedade atual observa-se que houve uma aceleração da transformação digital. Transformação essa que ganhou relevância por aproximar as pessoas e auxiliar processos, mantendo a funcionalidade nos ambientes corporativos, escolares, de compras e outros [7].

Segundo o vice-presidente de produtos 5G da Huawei, a melhoria da qualidade da rede proporciona o desenvolvimento contínuo dos padrões de avaliação. Pois, sabendo que essa tecnologia possui uma gama de aplicações, induz as empresas de telecomunicações focarem em melhorar seus desempenhos para se destacarem no mercado [6].

Em um dos relatórios da Cisco Systems, mostra que globalmente o número total de assinantes móveis tende a crescer de 5,1 bilhões em 2018 para 5,7 bilhões em 2023, como ilustrado na Figura 1. Esses valores em termos de população global representam 66% em 2018 e 71% em 2023 [8]. Dessa maneira, é importante fornecer uma experiência de rede 5G de alta qualidade e, para isso, uma opção é o MIMO com maior largura de banda.

Figura 1- Previsão do crescimento global de assinantes móveis até 2023.



Fonte: Adaptado de [8].

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivos Gerais

Nesse trabalho de conclusão de curso é apresentada uma avaliação comparativa de desempenho de um arranjo de antena de microfita no sistema MIMO operando na faixa de frequência de 26GHz , uma vez que esta é uma das faixas de frequências padronizadas para operar no Brasil de acordo com a ANATEL. A base do projeto é uma antena de microfita, de baixo custo, leve e construção simplificada. Características essas, que se enquadram na escolha de uma antena de microfita retangular. Sabendo que a quantidade do número de antenas interfere em diferentes fatores na qualidade de resposta de uma antena, a avaliação comparativa foi feita para arranjos de duas e quatro antenas.

1.3.2 Objetivo Específico

Os objetivos específicos propostos foram analisar os resultados de diferentes arranjos no mesmo formato geométrico, material de substrato e condutor. Além disso, foi utilizado o método de casamento de impedância com *inset feed* para melhorar parâmetros de resposta como a largura de banda e o ganho. Assim, a análise foi coerente com as necessidades demandas pela tecnologia 5G.

1.4 Justificativa

Segundo a ANATEL, o 5G possui três modos de uso, uma delas é o quesito da banda larga móvel avançada a qual é focada em altas velocidades de *download* e *upload* [11]. É nesse

ponto específico que esse trabalho se justifica porque o método MIMO é visto como tecnologia chave para a utilização de alta largura de banda e consequentemente melhoria na capacidade e cobertura de rede [6].

1.5 Organização do trabalho

Este trabalho é composto em cinco capítulos: o Capítulo 1 contendo a introdução, os objetivos e justificativas da proposta; o Capítulo 2 apresenta o referencial teórico com os equacionamentos da capacidade de canal dos sistemas de múltiplas antenas e uma análise da taxa de erro de bit do canal para as variações dos sistemas. No Capítulo 3 é descrita a metodologia para o cálculo das antenas e os parâmetros de configuração para o desenvolvimento da simulação. Os resultados obtidos da simulação são apresentados e discutidos no Capítulo 4. E, por fim, as conclusões gerais são apresentadas no Capítulo 5.

Capítulo 2

REFERENCIAL TEÓRICO

Neste Capítulo são apresentados os conceitos da tecnologia 5G, os equacionamentos da capacidade e análise da taxa de erro de bit do canal mediante as variações sistema MIMO. Além disso, é apresentado o porquê da utilização de antena de microfita.

2.1 QUINTA GERAÇÃO

Antes da pandemia a transformação digital já estava em ascensão, com o contexto atual houve uma maior aceleração nessa área. De acordo com o presidente da ABES, tem um estudo que mostra o aumento significativo da utilização de soluções tecnologias em 2020, impactando principalmente o mercado de *software*, o qual houve um crescimento maior do que 29% e que consequentemente impulsionou outros segmentos, como utilização de serviços em nuvem, inteligência artificial e segurança da informação, entre outros [12].

A quinta geração de rede móvel segundo a ANATEL, diferentemente das gerações anteriores a ela, possui o foco de ir além de melhorar somente o incremento de taxas de transmissão, mas, massificar e diversificar a *Internet of things* (IoT) em áreas como telemedicina, educação à distância, automação industrial e agrícola, segurança pública e outros [11].

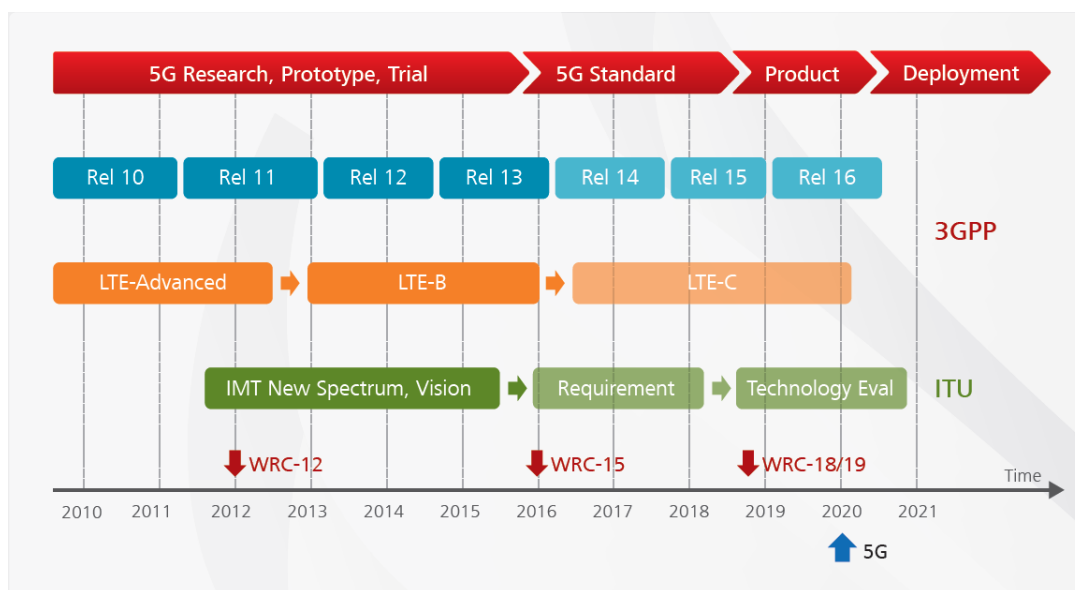
2.1.1 Padronização das redes móveis

Com essa movimentação na indústria de tecnologia móvel, ter um sistema padrão em que todos possam se comunicar globalmente é fundamental, a fim de garantir a mobilidade do usuário. Nesse cenário, destacam-se dois principais órgão de estudos e especificações do 5G, o 3GPP e o ITU (*International Telecommunication Union*). Sendo o ITU a agência das Nações Unidas responsáveis por coordenar operações e serviços de telecomunicações, fornecendo

orientação e apresentando os requisitos para a operação da tecnologia celular pelo mundo. E o 3GPP conforme as orientações da ITU desenvolve e avalia as especificações, para assim concordar e declarar conformidade.

A Figura 2 ilustra o cronograma de padronização 5G. Os estudos iniciaram-se em 2010, e a partir daí surgiram os primeiros requisitos técnicos de protótipo com a *Release 10* que utiliza a técnica LTE- *Advanced* (*Long Term Evolution – Advanced*) e apresenta técnicas MIMO mais avançadas. Em 2016, a indústria 5G começou a acelerar com a *Release 14* trabalhando com técnicas de IoT, a *Release 15*, considerada fase 1 do sistema 5G, trabalha com WLAN (*Wireless Local Area Network*) e espectro não licenciado e a *Release 16*, considerada fase 2, trabalha com aprimoramentos de comunicação ultra confiáveis e de baixa latência (URLLC – *Ultra Reliable and Low Latency Communication*), indústria IoT, 5G de eficiência com diminuição da interferência, aprimoramentos de mobilidade, entre outros avanços [14- 18].

Figura 2 - Cronograma da padronização 5G.

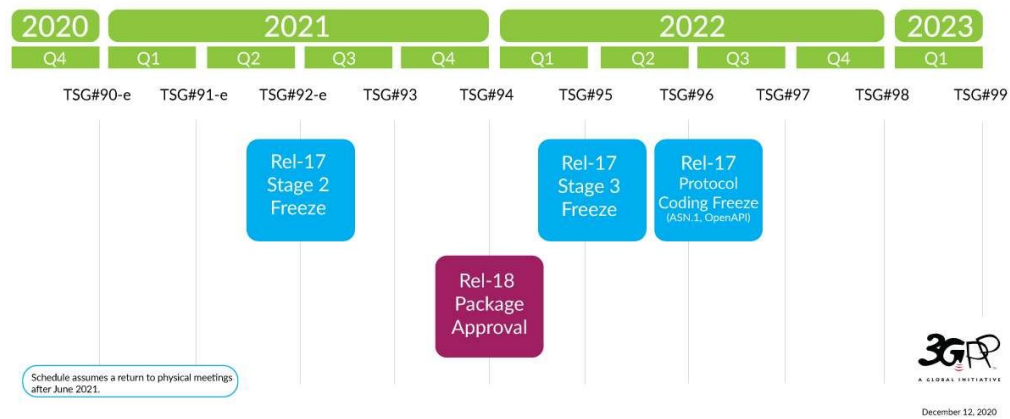


Fonte: [18].

No final de 2020, 3GPP propôs um novo cronograma para as especificações do *Release 17*, com previsão de conclusão no fim de 2022, como ilustra a Figura 3. Segundo ele, estão sendo feitos vários estudos que incluem aprimoramentos de cobertura e posicionamento, adição de novas faixas de frequência, suporte para sistemas aéreos não tripulados, entre outros. Essa nova etapa, possui alguns pontos de priorização como IoT industrial e URLLC (*Ultra- Reliable Low Latency*) aprimoramentos, baixo consumo, melhorias na cobertura NR (*New Radio*),

automação da rede 5G fase 2, NR MIMO, serviços interativos avançados como por exemplo [11,19].

Figura 3 -Cronograma da padronização 5G a partir do Release 17.

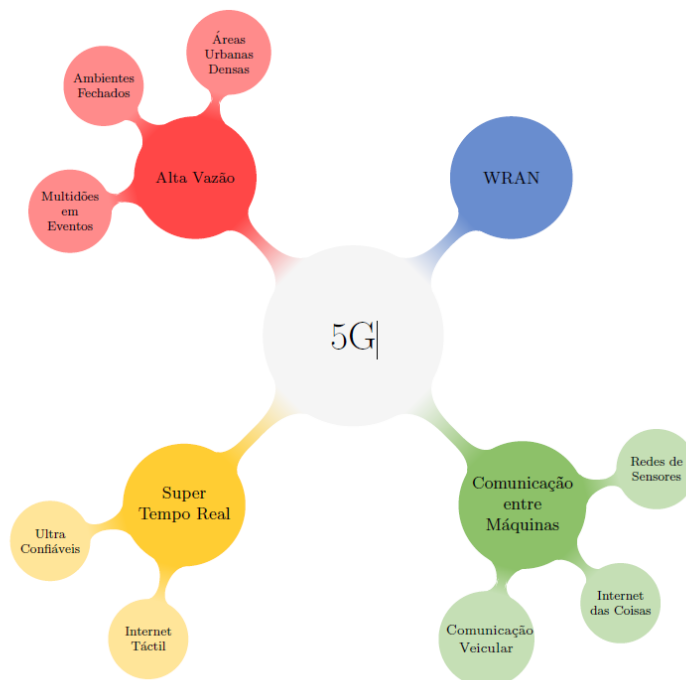


Fonte: [19].

2.1.2 Cenários

A Figura 4, mostra os cenários que irão fazer parte das redes 5G no Brasil. Onde se observa algumas áreas principais para a quinta geração móvel como: alta vazão, WRAN, super tempo real e comunicação entre máquinas [20].

Figura 4 – Cenários que irão compor as redes 5G no Brasil.



Fonte: [20].

Alta vazão: dentro deste cenário compõe áreas urbanas densas, ambientes fechados e multidões em eventos. Dessa maneira, visando atingir locais densamente populados tem-se uma maior necessidade de altas taxas de transmissão e maior volume de tráfego. Assim, torna-se necessário o uso eficiente do espectro de frequências fragmentado, bem como a utilização de faixas de frequências ociosas a fim de conseguir altas vazões para uma grande quantidade de usuários.

WRAN (*Wireless Regional Area Network*): este cenário é composto por áreas de baixa densidade populacional e pouca receita por usuário. Dessa forma, a implantação e a manutenção das infraestruturas de rede não são rentáveis. Portanto, é fundamental que a tecnologia 5G ofereça soluções para proporcionar acesso à internet nessas áreas. Como por exemplo, provendo um modo de operação que possua alcance superior a 50 km, de forma a atingir uma quantidade suficiente de prováveis assinantes utilizando uma única célula. Segundo o padrão IEEE 802.22 a utilização de lacunas espectrais nas faixas de TV podem ser uma solução para este cenário.

Comunicação entre máquinas: neste quesito considera-se as tendências de crescimento de redes elétricas inteligentes e cidades inteligentes, onde haverá diversos aparelhos autônomos conectados à internet (IoT). A utilização de comunicações M2M (*Machine to Machine*), por meio de redes de sensores e atuadores, tenderão a utilizar muitos aparelhos por célula. Visando esse cenário, é necessário que haja desenvolvimento de dispositivos de baixo custo e com tempo vida útil maior, uma vez que, a taxa de dados e latência necessária é menor quando comparada aos outros cenários.

Super tempo real: este contexto exige um maior rigor quanto ao tempo real de comunicação, pois necessitam de respostas praticamente instantâneas. Por isso, as redes 5G devem proporcionar um modo de operação cuja latência seja muito baixa. De acordo com estudos, para atingir esse requisito a camada física deve adotar uma latência pelo menos uma ordem de grandeza menor quando comparado ao que é obtido pelo *LTE-Advanced* que possui tempo de intervalo de resposta de 1 ms.

O Quadro 1 a seguir, mostra algumas das especificações de cada cenário mostrado anteriormente [20].

Quadro 1 – Especificações para os cenários do 5G

Parâmetro	Cenários			
	Alta vazão (Multidões em eventos)	WRAN	Comunicação entre máquinas (Internet das Coisas)	Super tempo real (Comunicações ultra- confiáveis)
Taxa de dados	Down link: 300 Mps Up link: 50 Mps	Down link: 10 Mps Up link: 10 Mps	alguns kps à 10 Mps	< 100 kbps
Latência	10 ms	100 ms	< 100 ms	< 1 ms
Frequência de operação	698 ~ 806 MHz	450 ~ 470 MHz	450 ~ 470 MHz	698 ~ 806 MHz
	2500 ~ 2690 MHz		698 ~ 806 MHz	2500 ~ 2690 MHz
			2500 ~ 2690 MHz	
Mobilidade dos usuários	0~3 km/h	0~3 km/h	0~3 km/h	0~80 km/h
Tamanho da célula	< 1 km	> 50 km	0,2 ~ 3 km	0,2 ~ 3 km

2.1.3 Cenário atual no Brasil

O leilão do 5G no Brasil, ocorreu no fim de 2021 onde ao todo a ANATEL vendeu 45 lotes nas faixas de frequências de 700 MHz; 2,3 GHz; 3,5 GHz e 26 GHz [22]. Segundo o edital da ANATEL, as operadoras deveriam oferecer a tecnologia nas capitais até 31 de julho, porém em junho de 2022 ela aprovou o pedido de prazo adicional de 60 dias e agora o período limite para a implantação nessas regiões é até o dia 28 de setembro [5]. O calendário que abrange inauguração do 5G em todos os municípios brasileiros se estende até 2029 [5].

Contudo, a atualização é fundamental para permitir a implantação das antenas de pequeno porte, que auxiliarão na concentração da cobertura. Sem esse “reaproveitamento” de estruturas para complementar a instauração do 5G, pode haver uma falta de continuidade e a não obtenção dos melhores valores de velocidade e latências que a tecnologia pode proporcionar [5].

Segundo o governo federal, tinha-se a previsão de que até junho/2022, 15 capitais e o Distrito Federal possuísssem a legislação necessária para receber o 5G, dentre elas estão Boa Vista (RR), Campo Grande (MS), Curitiba (PR), Florianópolis (SC), Fortaleza (CE), Manaus (AM), Natal (RN), Porto Velho (RO), Recife (PE), São Luís (MA), Rio de Janeiro (RJ), São Paulo (SP), Teresina (PI) e Vitória (ES), contudo nem todas conseguiram atingir o período estipulado. As demais capitais estão com projetos em tramitação nas Assembleias Legislativas que compõem programas de estímulo à quinta geração [5].

2.2 CAPACIDADE DO CANAL

O objetivo principal em um sistema de comunicação é enviar uma mensagem de uma fonte de interesse, por meio de um canal com ruído, até um usuário na parte final. Contudo, o sinal deve ser entregue de modo eficiente e confiável, e com algumas delimitações de projeto como: potência de transmissão aceitável, largura de banda de canal disponível e custo geral viável [23].

Em meios de comunicação, a confiabilidade normalmente é expressa em termos BER (*Bit Error Rate*) ou probabilidade de erros de bits avaliado na saída do receptor. Em um sistema ideal, apesar do canal ser ruidoso é possível que tenha taxa de erro de bits igual à zero. A comprovação para essa afirmação, baseia-se em um dos teoremas de Shannon, conhecido como teorema da capacidade de informação [23].

Segundo esse teorema, admite-se que B (largura de banda do canal) e SNR (relação sinal ruído) estão relacionados por C (capacidade de informação do canal) e que represente um canal *AWGN* (sem interferência Inter simbólica) conforme a equação seguinte [23].

$$C = B \log_2(1 + SNR) \quad [b/s]$$

A capacidade de informação é caracterizada como a taxa máxima na qual a informação pode ser propagada sem erros pelo canal e é medida em bits por segundo (b/s). Enquanto a taxa de transmissão de sinais real (R) em b/s, for menor do que a capacidade de informação é possível que o sinal de mensagem seja transmitido por meio de um sistema sem erros, ainda que o canal seja ruidoso [23].

Neste trabalho é considerado que os canais são estáticos e com *CSI* (*Channel State Information*) no transmissor e no receptor. Dessa forma, é considerado a hipótese de que conhecendo o canal no transmissor pode-se desconsiderar a capacidade de *outage*, em outras palavras, a probabilidade de a mensagem transmitida não ser recebida corretamente pelos receptores.

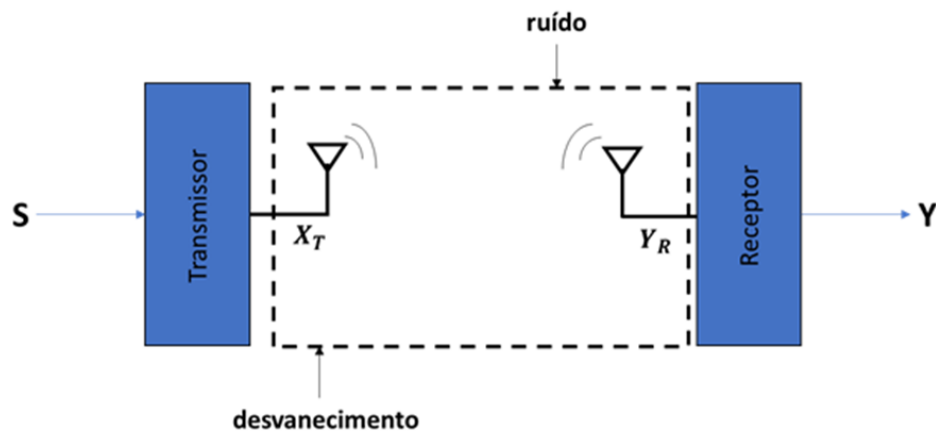
2.2.1 Capacidade de Sistemas de múltiplas antenas

A utilização de sistema múltiplas antenas tanto no transmissor quanto no receptor proporciona uma forma de diversidade espacial, uma vez que, são criados diferentes enlaces entre o par transmissor-receptor [25]. Dessa maneira, é analisado a diferentes respostas desses sistemas quanto à capacidade do canal e taxa de erros.

2.2.1.1 SISO

A Figura 5 ilustra o modelo do sistema de antenas SISO (*Single Input Single Output*) que consiste em uma única entrada transmissora e uma única saída receptora. Nesse diagrama, S representa a entrada; Y representa a saída, X_T representa a antena de transmissora e Y_R representa a antena receptora, onde o ruído é introduzido no sistema quando o sinal está sendo processado de X_T para Y_R e nesta etapa ocorre a atenuação do sinal [26].

Figura 5 - Modelo do sistema SISO.



Legenda:

S : entrada, X_T : antena transmissora, Y : saída, Y_R : antena receptora.

Fonte: Adaptado de [27].

A Equação 2.1 representa a capacidade do canal SISO [26].

$$C_{SISO} = B \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right) \quad (2.1)$$

Onde,

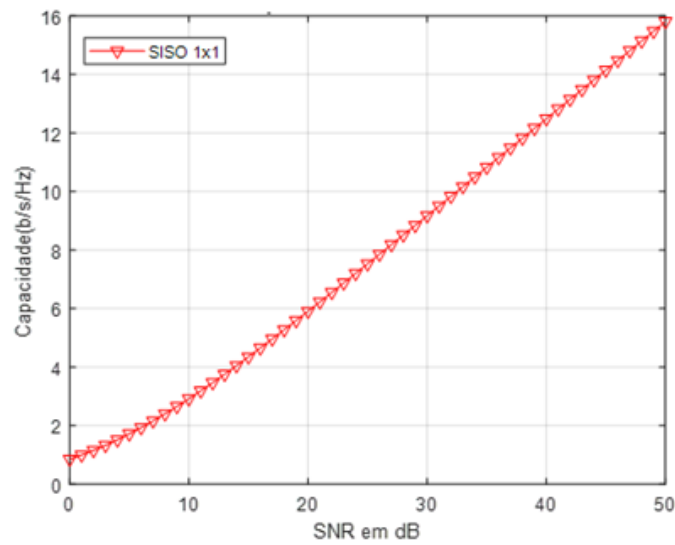
C_{SISO} - Capacidade do canal SISO;

B - Largura de banda do sinal; e

S/N - Relação sinal ruído.

A Figura 6 ilustra os resultados gráficos da capacidade do canal SISO em relação a variação da relação sinal ruído. Observa-se que o aumento da relação sinal ruído resulta no aumento da capacidade do canal SISO. Essas duas grandezas são diretamente proporcionais. A largura de banda do canal no SISO é limitada pela lei de *Shannon* que define uma taxa máxima teórica na qual os bits sem erros podem ser transmitidos por um canal de largura de banda limitada na presença de ruído [26].

Figura 6 - Capacidade do SISO.

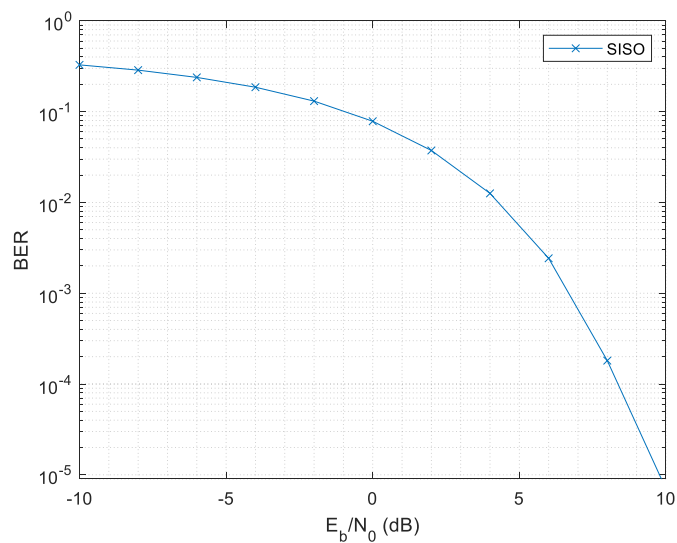


Fonte: A autora.

Utilizando a modulação BPSK (*Binary Phase Shift Keying*), tem-se a Figura 7 que ilustra os resultados gráficos da taxa de erro de bit em função da relação sinal ruído. Neste caso, a relação sinal ruído relaciona a energia do bit e a densidade espectral de potência do ruído (E_b/N_0). Observa-se que a taxa de erro de bits decresce, com aumento da relação sinal ruído.

Dessa forma, a maior vantagem da utilização do sistema SISO, em relação aos demais sistemas, é sua simplicidade, facilidade de implementação e o custo baixo.

Figura 7 - BER do SISO.

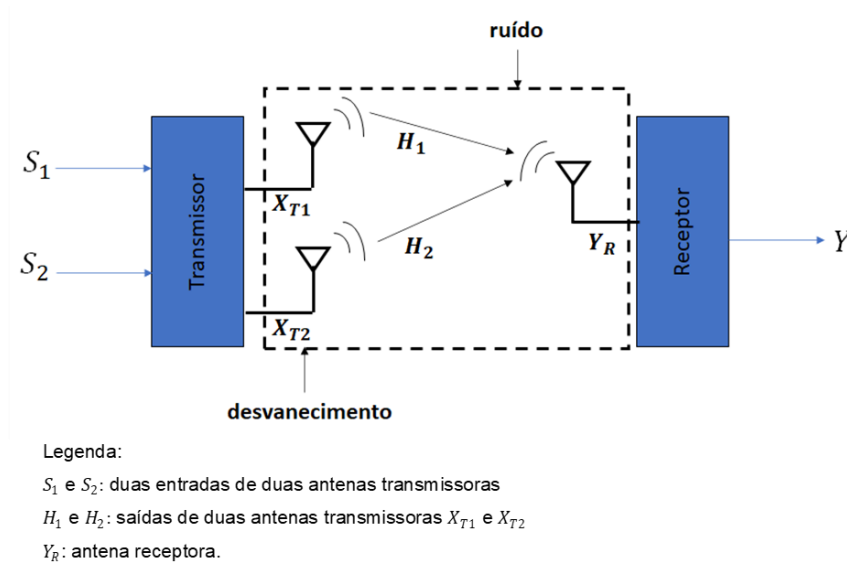


Fonte: A autora.

2.2.1.2 MISO

No sistema MISO (*Multiple Input Single Output*) pode-se ter múltiplas antenas para cada sinal a ser enviado e uma única antena receptora para captar os sinais vindo das múltiplas antenas. Isso significa que existem diferentes fontes disponíveis, mas apenas um destino disponível. A Figura 8 ilustra o modelo do sistema MISO com duas antenas transmissoras e uma receptora, porém, é possível ter n antenas transmissoras.

Figura 8 - Modelo do sistema MISO.



Fonte: Adaptado de [27].

Na Equação 2.2 define-se a capacidade do canal MISO [26].

$$C_{MISO} = M_T B \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right) \quad (2.2)$$

Onde,

C_{MISO} - Capacidade do canal MISO;

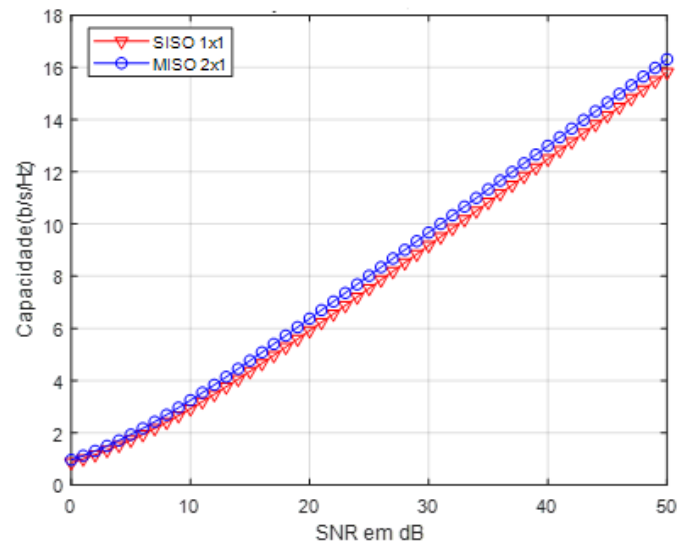
M_T - Número de antenas transmissora usadas;

B - Largura de banda do sinal; e

S/N - Relação sinal ruído.

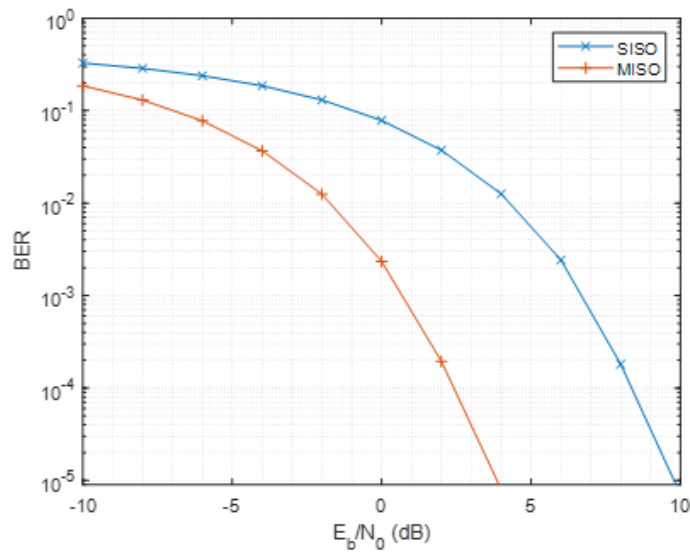
A Figura 9 ilustra a comparação de crescimento da capacidade de canal dos sistemas SISO (1×1) e MISO (2×1). Observa-se que a capacidade do canal não aumentou de forma expressiva no MISO (2×1), porém é ligeiramente maior do que no SISO (1×1). E a Figura 10 ilustra a comparação dos resultados da BER para os sistemas SISO (1×1) e MISO (2×1), utilizando a modulação BPSK.

Figura 9 - Capacidade do MISO (2 x 1).



Fonte: A autora.

Figura 10 - BER do MISO (2 x 1).



Fonte: A autora.

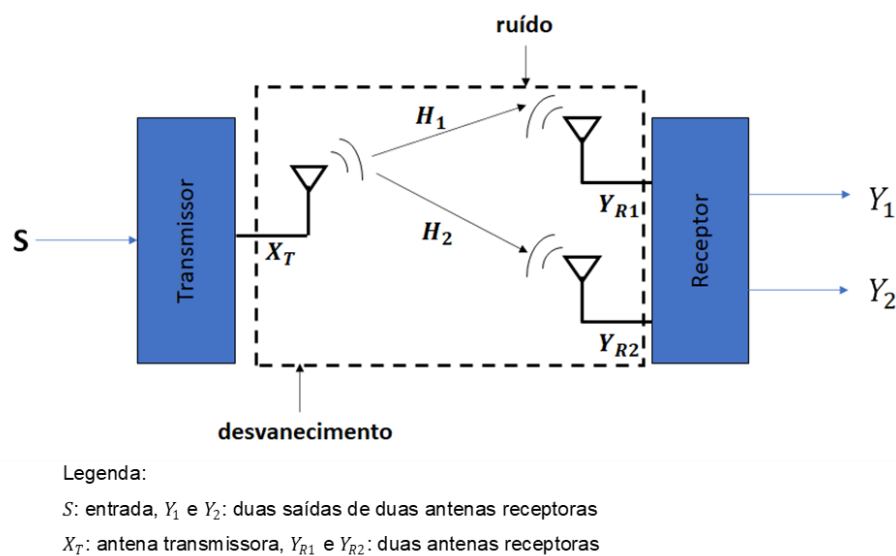
Ao analisar as Figuras 9 e 10 verifica-se que o sistema com múltiplas entradas MISO (2 x 1) obteve melhor desempenho expressivo em relação a BER do SISO (1 x 1). Esse esquema de antenas auxilia na recuperação do sinal original na extremidade de recepção com menor perda de caminho do que no SISO e SIMO. A outra vantagem é no quesito do desvanecimento, que é menor quando comparado as com as técnicas de entrada simples, já que neste há mais antenas transmissoras [26].

2.2.1.3 SIMO

O sistema SIMO (*Single Input Multiple Output*) é caracterizado por possuir uma única antena transmissora e múltiplas antenas receptoras. Dessa maneira, proporciona o aumento da diversidade espacial de recebimento nos receptores quando comparado ao sistema SISO [26].

A Figura 11 ilustra o modelo SIMO com uma antena transmissora e duas receptoras, porém, é possível ter n antenas receptoras.

Figura 11 - Modelo do sistema SIMO.



Fonte: Adaptado de [27].

No SIMO muitas técnicas de recepção podem ser utilizadas devido à implementação de várias antenas receptoras. Porém, apesar de apresentar uma melhor diversidade de recepção nas antenas, não há melhora na capacidade do canal [26].

Na Equação 2.3 define-se a capacidade do canal SIMO [26].

$$C_{SIMO} = M_R B \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right) \quad (2.3)$$

Onde,

C_{SIMO} - Capacidade do canal SIMO;

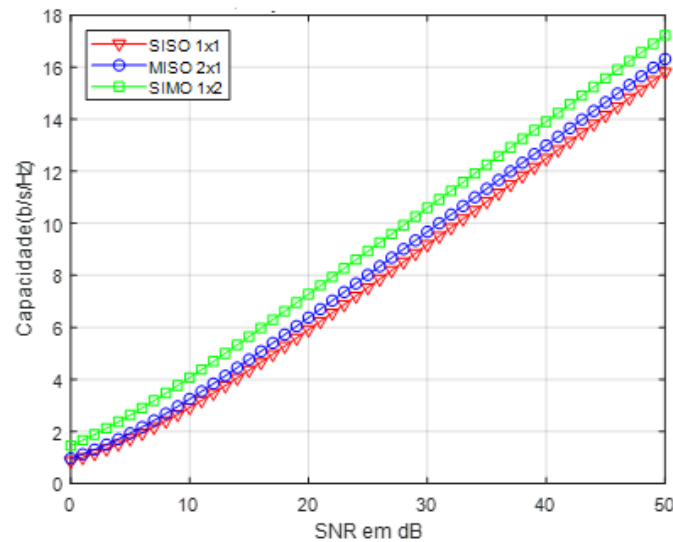
M_R - Número de antenas utilizadas do lado receptor;

B - Largura de banda do canal; e

S/N - Relação sinal ruído.

A Figura 12 ilustra a comparação de crescimento da capacidade de canal dos sistemas SISO (1 x 1), MISO (2 x 1) e SIMO (1 x 2).

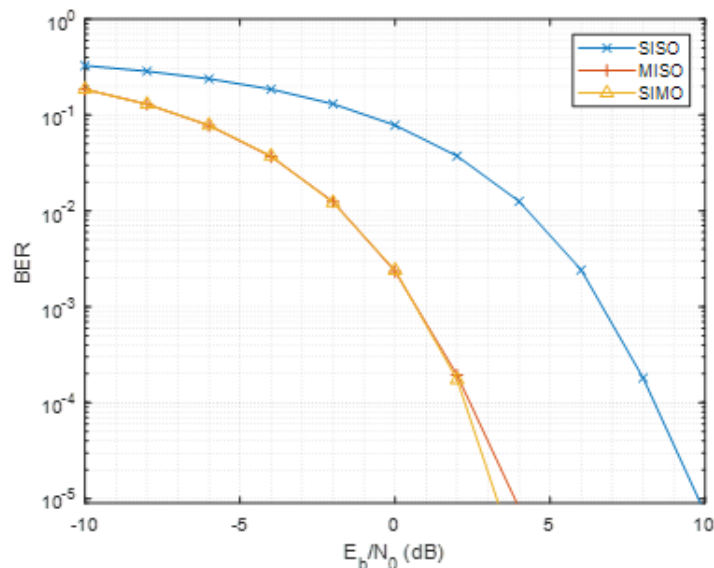
Figura 12 - Capacidade do SIMO (1 x 2).



Fonte: A autora.

A Figura 13 ilustra os resultados da BER para os sistemas SISO (1 x 1), MISO (2 x 1) e SIMO (1 x 2), utilizando a modulação BPSK.

Figura 13 - BER do SIMO (1 x 2).



Fonte: A autora.

Após as análises gráficas, observa-se que apesar do sistema SIMO e MISO apresentarem o mesmo número de M_T e M_R , conforme as equações (2.2) e (2.3). O sistema SIMO apresenta uma maior capacidade do canal e menor taxa de BER, por possuir M_R antenas receptoras, que

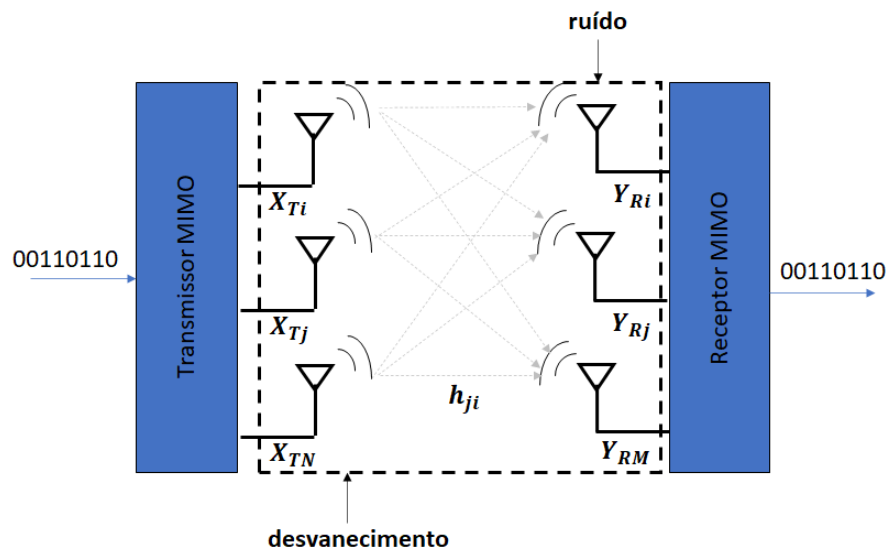
proporcionam uma maior diversidade espacial, uma vez que o sinal possui diferentes caminhos para chegar ao receptor com menos interferência. Consequentemente, resultando em um sinal ao final do percurso, com menor taxa de erro e melhor capacidade. Esse sistema de entrada simples e múltiplas saídas é utilizado principalmente em dispositivos como aparelhos celulares e com isso o desempenho dos sistemas apresenta algumas restrições devido parâmetros físicos como bateria, tamanho, por exemplo [26].

2.2.1.4 MIMO

No sistema MIMO (*Multiple Input Multiple Output*) pode-se ter múltiplas antenas transmissoras para cada sinal a ser enviado e múltiplas antenas receptoras para cada sinal a ser recebido. Ao considerar que possa haver várias antenas de transmissão, o sinal pode ser transmitido por qualquer antenna e, portanto, pode seguir qualquer caminho para chegar em uma antenna receptora. Contudo, esse caminho seguido depende da posição da antenna, ou seja, alterando essa posição o caminho pode mudar e assim mudando as diferentes dispersões do sinal [26].

A Figura 14 ilustra o modelo MIMO com N número de antenas transmissoras e M número de antenas receptoras. Quando a taxa de dados é maior para um único usuário usando MIMO é chamada de SU-MIMO (*Single User – MIMO*), enquanto para vários usuários é conhecido como MU-MIMO (*Multiple User – MIMO*).

Figura 14 - Modelo do sistema MIMO.



Fonte: Adaptado de [27].

A Equação 2.4 mostra a representação matemática em forma de matriz $N \times M$.

$$\begin{bmatrix} h_{11}h_{12} & \cdots & h_{(1N)} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{(M_1)}h_{(M_2)} & \cdots & h_{MN} \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

Onde, $h_{11}h_{12}, \dots$ são as variáveis de ganho de desvanecimento entre a antena transmissora e receptora. A relação de entrada e a saída na antena MIMO pode ser descrita pela Equação (2.5):

$$output[y^{(t)}] = \sum_{(j=1)}^N h_{(NM)}S_{(M)}(t) \quad (2.5)$$

Onde, $S_M(t)$ representa o sinal recebido da M^{th} antena que foi transmitida pela j^{th} antena.

Assim define-se a capacidade de canal do sistema MIMO na Equação (2.6) [26]:

$$C_{MIMO} = M_T M_R B \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right) \quad (2.6)$$

Onde,

C - Capacidade de canal do sistema MIMO;

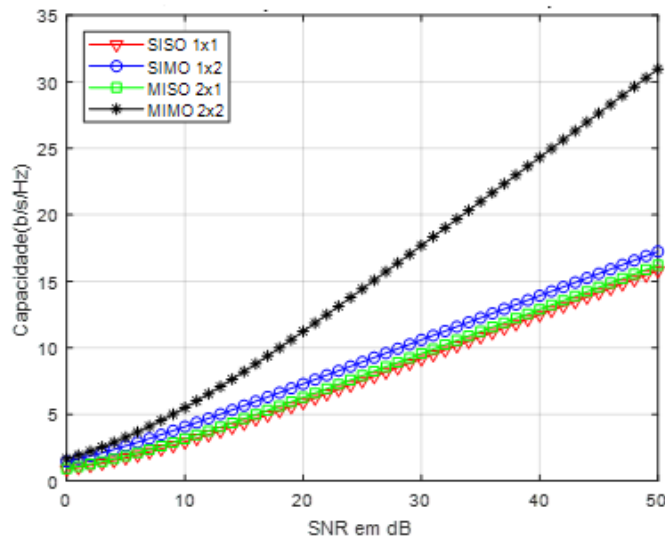
M_T - Número de antenas transmissoras;

M_R - Número de antenas receptoras; e

S/N - Relação sinal ruído.

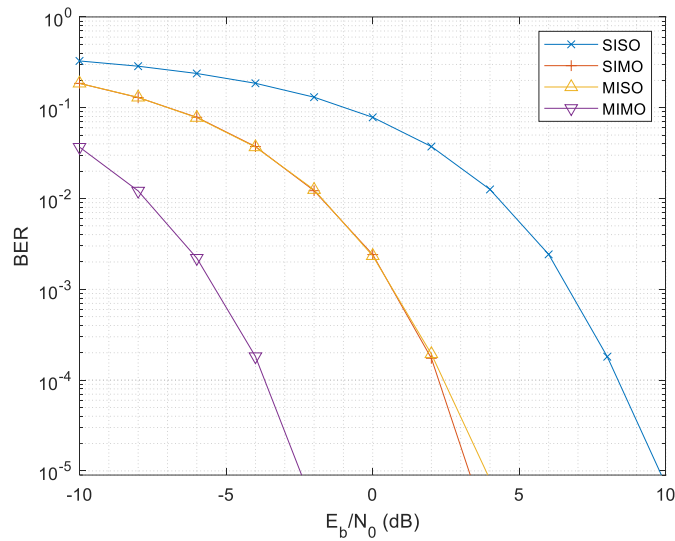
A Figura 15 ilustra graficamente a diferença da capacidade do canal e a Figura 16 ilustra a diferença em relação a taxa de erro de bits, a qual foi utilizada a modulação BPSK para sua simulação, respectivamente.

Figura 15 - Capacidade do MIMO (2 x 2).



Fonte: A autora.

Figura 16 - BER do MIMO (2 x 2).



Fonte: A autora.

As Tabelas 1 e 2 mostram uma releitura dos resultados obtidos graficamente da capacidade de canal e taxa de erro de bit. Considerou-se a SNR máxima de 50 dB e E_b/N_0 mínimo de -10 dB.

Tabela 1 - Capacidade de canal (SISO, MISO, SIMO, MIMO).

	Capacidade do Canal	Gráfico Capacidade do Canal (b / s / Hz)	SNR (dB)
SISO	$C_{SISO} = B \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right)$	15.79	50
MISO	$C_{MISO} = M_T B \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right)$	16.17	50
SIMO	$C_{SIMO} = M_R B \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right)$	17.22	50
MIMO	$C_{MIMO} = N M B \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right)$	30.96	50

Fonte: A autora.

Para a análise dos resultados das Tabelas 1 e 2 e dos equacionamentos (2.2) e (2.3), referente aos sistemas MISO e SIMO, foi considerado que o número de antenas transmissoras (M_T) é igual ao número de antenas receptoras (M_R), em seus respectivos equacionamentos. Após as comparações das diferentes variações do número de antenas transmissoras e receptoras, pode-se concluir que o sistema MIMO é o que possui melhor resposta tanto em capacidade do canal, quanto em taxa de erro de bits. Isso é justificado uma vez que, os sistemas que possuem

múltiplas entradas e múltiplas saídas, apresentam melhor diversidade espacial, que proporciona uma redução da probabilidade de erros na recuperação da mensagem.

Tabela 2 -Taxa de erro de bits (SISO, MISO, SIMO, MIMO).

	Taxa de erro de bits	E_b/N_0
	BER	(dB)
SISO	0.3275	-10
MISO	0.1855	-10
SIMO	0.1855	-10
MIMO	0.03684	-10

Fonte: A autora.

2.3 ANTENAS MIMO

O conceito de antenas MIMO, tem sido aplicado às comunicações móveis, recentemente, com o intuito de auxiliar na resolução de problemas como limitação de largura de banda do canal, melhoria de desempenho relacionado ao aumento da capacidade do canal, ampliação de cobertura, formação de múltiplos feixes para alcançar diferentes terminais móveis, e atenuação do desvanecimento multi trajeto [28].

Essas redes de antenas são consideradas adaptativas, uma vez que, suas características se adaptam dinamicamente a situações específicas, e são normalmente indicadas para minimizar os efeitos de interferência em sistemas de comunicação. As limitações de capacidade e alcance, em sistemas celulares, são resultadas principalmente das interferências intra sistema, uma redução desses obstáculos proporciona em um ganho operacional.

Dessa forma, os novos sistemas móveis têm utilizado recursos como a utilização de antenas inteligentes, em que a cobertura de um setor possui múltiplos feixes, por meio do uso de conjuntos de antenas, onde o número de feixes no setor é uma função da geometria do conjunto. Assim, as antenas inteligentes conseguem direcionar melhor o diagrama de radiação e diminuir interferências indesejadas, consequentemente proporcionam menor taxa de erros de bits e melhorias na capacidade e ao ser associado à técnica MIMO, podem proporcionar melhores resultados [28].

2.3.1 Características

O sistema MIMO (*Multiple Input Multiple Output*) é caracterizado por um sistema de uso de múltiplas antenas transmissoras e receptoras que possuem o objetivo de melhorar o

desempenho, em termos de ganho de potência, de graus de liberdade e proporcionar maior confiança na rede comunicação. Portanto, é visto como uma ferramenta muito importante para o aumento da capacidade do canal e favorável para suprir o aumento das demandas de taxa de dados, por isso, é visto como uma das tecnologias principais para auxiliar na implementação do 5G.

O funcionamento deste tipo de antena é configurado em multiplexação espacial. O fluxo de informações é dividido pela quantidade de antenas transmissoras e cada parcela é transmitida por uma delas, dessa maneira transmite-se uma quantidade de dados muito maior em uma quantidade de tempo menor. A recepção ocorre devido à sinalização de cada parcela, permitindo que a informação seja captada na ordem correta em cada uma das antenas receptoras [21].

2.3.2 Vantagens

Nessa seção são apresentadas as principais vantagens do sistema MIMO [24]:

- **Ganho de Arranjo:** pode ser atingido por meio do processamento no transmissor e no receptor, o que proporciona em um aumento na SNR média de recepção, resultado do efeito de combinação coerente da energia captada em todas as antenas receptoras do sistema. O ganho do sistema está ligado ao número de antenas transmissoras e receptoras, bem como é necessário ter conhecimento do canal no transmissor e receptor;

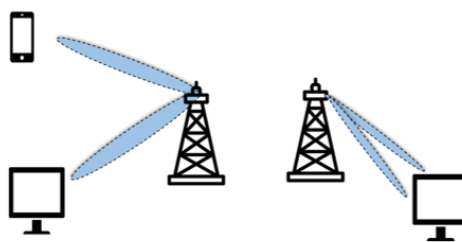
A diversidade pode ser interpretada como uma forma de redundância. É quando a informação é transmitida em realizações distintas do canal, de modo a reduzir a probabilidade de erros na recuperação da mensagem. Ao considerar, que diferentes réplicas do sinal de mensagem podem ser transmitidas simultaneamente por meio de canais independentes desvanecentes, existe então, uma possibilidade de que pelo menos um dos sinais captados não esteja muito degradado pela dispersão ao longo caminho. Dentro desta técnica pode-se separar em três grupos:

- **Diversidade Temporal:** a mesma informação é enviada do transmissor ao receptor em espaços de tempo distintos e maiores que o espaço de coerência do canal, resultando em dispersões independentes entre as palavras-código. Desse modo, conjuntos de palavras que não foram recuperados corretamente podem ser recuperados por meio da transmissão em outro instante que experimentou condições mais favoráveis do canal.

- **Diversidade em Frequência:** a mesma palavra código experimenta diferentes faixas de frequência de maneira a possibilitar a dispersão independente, de acordo com a coerência do canal à frequência. Possui uma maior relevância quando a banda de coerência do canal tem a largura próxima à largura de banda da informação transmitida.
- **Diversidade Espacial:** a informação é enviada por diferentes antenas. A fim de um bom resultado é importante que os enlaces formados por distintos pares de antenas transmissora/ receptora apresentem baixa correlação, proporcionando que o código enviado através desses enlaces experimente diversos desvanecimentos e a SNR no receptor seja maior. O ganho desta técnica é baseado no número de enlaces consideravelmente descorrelacionados que idealmente é obtido pelo produto entre o número de antenas transmissoras e receptoras.

Na multiplexação espacial tem-se inicialmente um sinal com altas taxas de transmissão fracionadas em várias *streams* de taxa menor. Elas são enviadas utilizando os mesmos recursos de tempo e frequência. A identificação das *streams* ocorre por meio dos sinais de referência, contudo, este método possui alto nível de interferência, que podem ocorrer especialmente em condições de baixa relação sinal-ruído (SNR – *Signal to Noise Ratio*), ou seja, em regiões próximas a borda da célula. Portanto, utiliza-se esta técnica em cenários onde a SNR é visivelmente mais elevada. Ela pode ser dividida em dois tipos:

Figura 17 - Tipos de multiplexação espacial.



a) Multiplexação Espacial Multiusuário b) Multiplexação Espacial Usuário-Único

Fonte: Adaptado de [24].

- **Multiplexação multiusuário:** o fluxo de informações transmitidas por diferentes antenas atinge diferentes usuários, como ilustra a Figura 17 (a);
- **Multiplexação usuário-único:** as diferentes antenas transmissoras fornecem informações ou serviços a um mesmo usuário, como ilustra a Figura 17 (b).

2.3.3 Desvantagens

Apesar do sistema apresentar melhorias nos sistemas, apresenta algumas desvantagens como [29]:

- **Interferência de multiusuário:** embora as técnicas na recepção, como DPC (*Dirty Paper Coding*) no *dowlink* e o ML (*Maximum Likelihood*) no *uplink*, auxiliem no problema da interferência, os dois possuem complexidade de implementação.
- **Programação de usuários:** com a presença de vários usuários utilizando os mesmos recursos de tempo – frequência, os sistemas de programação buscam a triagem de grupos de usuários, o que gera um aumento do custo, pois emprega pré-codificadores, estruturas de detecção e conhecimento do canal.
- **Obtenção do CSI (*Channel State Information*):** para adquirir o ganho de multiplexação espacial, há a necessidade de que a BTS (*Base Transceiver Station*) processe o sinal recebido com coerência.

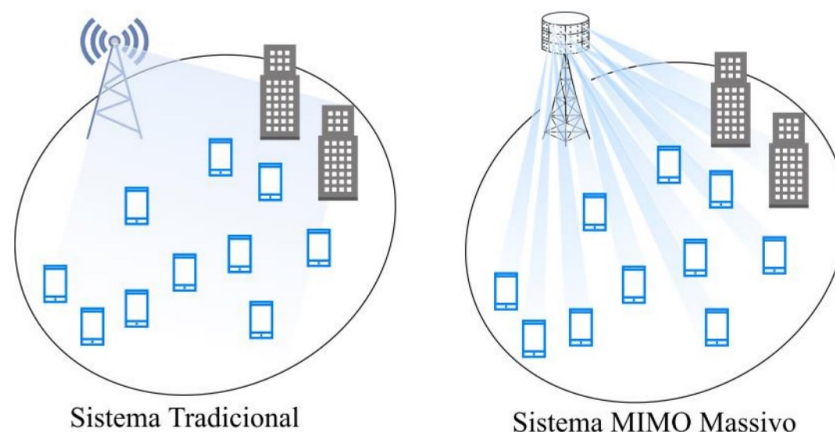
2.3.4 MIMO Massivo

O sistema de múltiplas entradas e múltiplas saídas visam uma transferência de dados com maior eficiência de rede. Para isso, com um aumento no número de antenas, o sinal terá maior possibilidade de caminhos e poderá apresentar melhor desempenho do sistema quanto à taxa de transmissão, confiabilidade e cobertura de rede [13,30].

Dessa forma, com o maior fluxo de dados espaciais, pode haver um aumento da eficiência espectral, que impacta para que uma maior quantidade de bits seja transmitida. Além disso, a utilização de técnicas de *beamforming*, que possui a finalidade de direcionar um sinal em um feixe em um feixe que foca apenas na direção de um usuário, ao invés de transmitir em várias direções ao mesmo tempo, será um elemento fundamental para proporcionar uma melhor experiência aos usuários, como mostra a Figura 18.

Para sistemas MIMO massivo, empregam-se de dezenas até centenas de antenas. Com esse número maior, há um maior foco da energia do sinal de transmissão e recepção em áreas menores da célula, disponibilizando valores maiores de eficiência. Outra característica desses sistemas está na redução de efeitos do ruído e do desvanecimento, bem como a interferência intracelular pode ser atenuada por meio da utilização de pré-codificação linear e técnicas de detecção de erro [30].

Figura 18 - Comparação entre sistema tradicional e sistema MIMO massivo.



Fonte: [31].

Aplicando o método MIMO por multiusuários (MU-MIMO) no MIMO massivo é possível melhorar a capacidade do sistema por meio de uma multiplexação espacial com a utilização das antenas dos aparelhos de diferentes usuários, considerando que cada dispositivo do *user* terá algumas antenas limitadas por tamanho e custo. Além disso, a estação rádio base (ERB) pode transmitir sinais distintos para usuários individuais dispondo dos mesmos recursos de tempo e frequência [30].

2.3.5 Aplicações em comunicações móveis

Quanto às aplicações, os sistemas MIMO possuem uma grande área de importância em diversos setores tecnológicos. Desde sistemas de satélites, sistemas de geolocalização, radares, sistemas de imagem até o sistema mais próximo da sociedade, como telefonia móvel. O Quadro 2 exemplifica alguns locais onde pode-se empregar os sistemas MIMO [32].

Quadro 2 -Aplicações MIMO em comunicações móveis.

Aplicações	Descrição
3GPP LTE	Representa a quarta geração de telefonia móvel, em que se utilizam a tecnologia MUMIMO (multiusuário). Com esta a esta tecnologia, o espectro de radiofrequências disponíveis redes 3GPP LTE possui capacidade de alcançar maiores eficiências espectrais do que as redes 3G existentes.
Release 8 LTE	Esta atualização inseriu a ideia do SU-MIMO (usuário único).

Release 9 LTE	A segunda versão do LTE (Release 9) fornece melhorias para Release 8, onde introduz tanto esquemas SU-MIMO (usuário único) e MU-MIMO.
LTE Advanced	Esta versão é resultado do progresso em Sistemas MIMO LTE o qual permite alternar em uma possível troca entre SU-MIMO e MU-MIMO.
Redes de células múltiplas / Release 10 LTE	Nesta fase há a utilização de redes de células múltiplas com vários canais de acesso, onde possíveis coordenações entre as estações base é estabelecida.
Release 12 LTE	Nesta atualização foi implementado modelagem 3D do canal MIMO, formação de feixe em plano de elevação, MIMO Massivo que são sistemas MIMO em larga escala, MIMO multidimensional responsável por um menor tempo de latência.
Digital Subscriber Line (DSL)	Utiliza-se sistemas MU-MIMO aplicados tanto em redes multicelulares quanto em aplicações em outros sistemas, tais como o downlink de um <i>Digital Subscriber Line (DSL)</i> .

Fonte: Adaptado de [32].

2.4 SISTEMAS DE MÚLTIPLAS ANTENAS

2.4.1 Arranjos de antenas

Um dos fatores que interferem os projetos de sistemas de comunicações são as limitações do espectro de frequência. Tem-se diferentes estudos que mostram que utilizando um arranjo apropriado para determinados sistemas, há melhoras no desempenho do sistema como aumento da capacidade de encaminhamento e da eficiência espectral. Bem como melhoras na extensão de cobertura, probabilidade de ajuste da forma do feixe resultante do arranjo e orientação de feixes múltiplos, a fim de, acompanhar os diferentes usuários móveis. Outro conjunto de melhorias, da utilização agrupamento de forma organizada de antenas em um espaço específico, ou seja, os arranjos, está ligado ao quesito de diminuição do desvanecimento por multipercursos, interferências co-canal, taxa de erros de bits e custos do sistema [29,33].

Esses agrupamentos podem ser utilizados em diversas áreas, como sistemas móveis terrestres e por satélites, comunicação intersatélites e outros. Um arranjo de antenas pode ser

aplicado para diferentes objetivos com o intuito de melhorar a performance de um sistema de telecomunicações. O emprego mais comum para um arranjo é quanto à cobertura de uma célula de comunicação por meio da existência de múltiplos feixes estocásticos, denominados como setorização.

Esse tipo de organização de antenas possui algumas vantagens:

- **Redução do espelhamento e do desvanecimento do multipercurso:** devido ao sinal multipercurso percorrer diferentes direções e distâncias, além da existência de obstáculos no caminho, resulta em um espalhamento. Para isso, o arranjo possui a intenção de minimizar esse problema, por meio de criação de feixes e nulos que podem proporcionar o cancelamento das componentes atrasadas tanto na transmissão quanto na recepção.
- **Redução da interferência de co-canal:** considerando que o sinal desejado chegue ao arranjo em uma direção divergente das direções por onde chegam as interferências indesejadas, pode haver um ajuste do diagrama de radiação a fim de que atenda aos requisitos pré-estabelecidos a partir da utilização de valores diferenciados aos sinais recebidos por cada antena que compreende o arranjo.
- **Melhora na eficiência espectral:** ao considerar uma faixa do espectro de frequências específica, sabe-se que à medida que a quantidade de tráfego de dados de um sistema aumenta, resultará em uma maior eficiência espectral. Assim, um arranjo de antenas proporciona que haja um número maior de usuários no sistema sem que haja diminuição de desempenho quando comparado à utilização de uma antena apenas.
- **Redução de *Bit Error Rate* (BER):** em sistemas de comunicação digital quanto menor a BER mais confiável será o sistema. Um dos fatores que proporcionam a redução dessa taxa, está relacionado à diminuição da interferência do co-canal, isso pois, a probabilidade de um canal estar ineficiente está relacionado ao aumento da taxa de erros associada aos dados recebidos, como também à intensidade do sinal. Isso pois, considerando que o arranjo resulte em um aumento dessa intensidade do sinal, para um sistema exposto à mesma presença de ruído, o resultado tende a atingir um aumento da capacidade do canal e eficiência espectral.
- **Aumento da eficiência de transmissão:** a princípio um arranjo de antena possui a vantagem inicial em comparação à uma única antena, no quesito diretividade. Outro fator que colabora para a eficiência de transmissão é no quesito potência transmitida

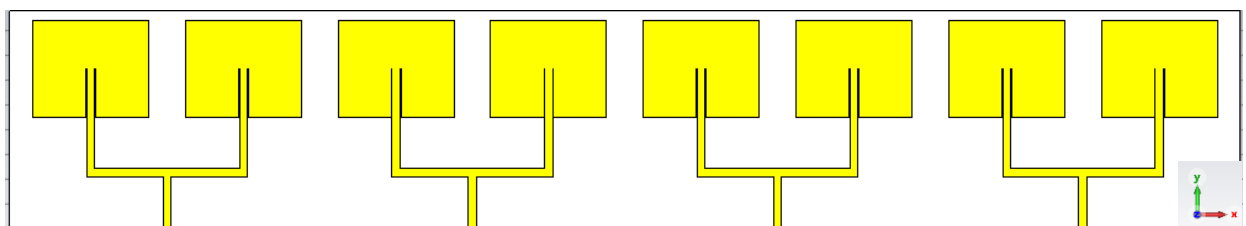
pelas antenas. Em um sistema onde há apenas uma antena, toda a potência da BTS é enviada por ela mesma, em contrapartida, em um arranjo a potência transmitida por cada antena é menor. A diretividade do arranjo amplifica ainda mais para que a potência transmitida pelas antenas seja bem menor do que a necessária, quando comparada à uma antena. Portanto, a eficiência do sistema aumenta e a complexidade é menor.

Existem diferentes tipos de arranjos que podem variar quanto à quantidade de faces, de níveis, de níveis por faces, potência e fase por elemento, disposição mecânica do elemento que pode ser manipulado conforme a arquitetura escolhida para o arranjo, ou seja, se trata de um arranjo horizontal, vertical ou a mescla entre eles [34]. Os arranjos também podem variar quanto à geometria e tipos de alimentação como: série, paralelo, a mistura dos dois, entre outros [35].

Segundo Wentworth, um arranjo ajustadamente espaçado, proporciona uma variação considerável de fase (ϕ), o que resulta na melhoria da diretividade. Além disso, um arranjo de antenas também pode ser planejado para obter um diagrama de radiação com formato específico. Conjuntos de antenas avançados possuem a versatilidade de serem construídos utilizando diferentes elementos de antena excitados por correntes com amplitudes e fase variáveis [36].

Para o presente trabalho, será considerado o arranjo linear uniforme, ULA (*Uniform Linear Array*), no qual representa um sistema unidimensional em que os elementos estão organizados sobre uma linha retilínea, os espaçamentos entre todos os elementos são iguais, a defasagem e a corrente que excita o sistema possuem a mesma amplitude [29,37]. E neste caso será configurado para uma alimentação paralela e geometria retangular, conforme mostra a figura a seguir.

Figura 19 - Arranjo linear uniforme com alimentação em paralelo.



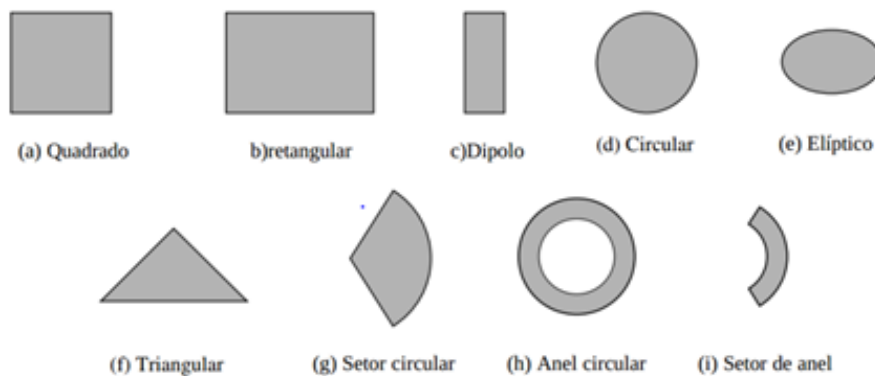
Fonte: Autora.

2.5 ANTENAS DE MICROFITA

As antenas de microfita passaram ser difundidas na prática com maior proporção a partir da década de 70 e a partir de então, devido à facilidade de fabricação por utilizar a tecnologia de circuito impresso, ter boa compatibilidade com circuitos integrados, ter baixo custo e ser leve, elas passaram a ser temas de pesquisas. Esse tipo de antena é basicamente composto por um condutor irradiante (*patch*), um dielétrico e um plano terra. O condutor deve apresentar uma superfície metálica bem fina e estar sobre o dielétrico que também deve possuir espessura pequena.

Apresentam versatilidade em termos de frequência de ressonância, polarização, diagrama de irradiação e impedância, dependendo do elemento e o modo irradiante que é escolhido para o projeto. A geométrica do *patch* da antena, pode ser de diferentes formas: quadrada, retangular, circular, elíptico, entre outros, como mostra a Figura 20. As formas mais usuais são a retangular e circular, devido a maior facilidade de análise de comportamento e construção [39].

Figura 20 - Formatos utilizados para *patch*.



Fonte: [40]

Capítulo 3

MATERIAIS E MÉTODOS

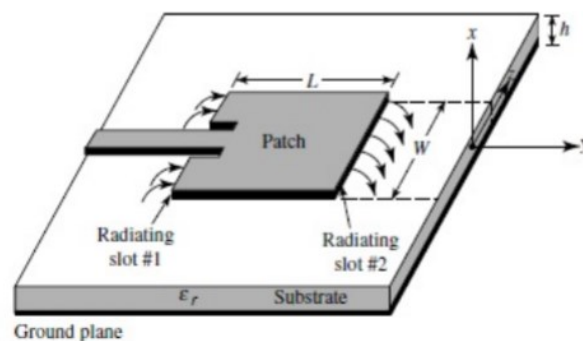
Neste Capítulo são apresentados os equacionamentos utilizados nos projetos das antenas de microfita e os softwares utilizados na modelagem delas.

O aumento das pesquisas para a melhoria nas comunicações entre pessoas ou coisas tornou o tema antenas relevante. Com isto, surgiram diferentes alternativas para atender as demandas e uma delas é antena de microfita que possui baixo custo, facilidade de integração ao circuito, leve e construção simplificada [41].

3.1 Dimensionamento da base da antena de microfita

Esse tipo de antena, constitui basicamente de um condutor irradiante - *patch*, um substrato dielétrico e um plano terra como ilustrado a seguir.

Figura 21 - Configuração genérica de uma antena de microfita.



Fonte: [40].

No quesito dimensões, o *patch* deve conter uma superfície metálica fina ($t \ll \lambda_0$, onde λ_0 é o comprimento de onda no espaço livre e t é a espessura do condutor) e o dielétrico deve possuir uma espessura pequena ($h \ll \lambda_0$, normalmente $0,003\lambda_0 \leq h \leq 0,05\lambda_0$) [30, 42].

No caso do presente trabalho, foi escolhido o *patch* retangular devido sua maior utilização e maior facilidade de implementação. Para desenvolvimento da antena proposta,

inicialmente, é necessário definir os seguintes parâmetros: frequência de operação (f_c), constante dielétrica relativa do substrato (ϵ_r) e altura do substrato (h). Definido os parâmetros iniciais, a próxima etapa é o cálculo das dimensões da antena: a largura (W) e o comprimento da antena (L).

Segundo Balanis, para um condutor eficiente a largura da antena deve ser calculada conforme a Equação (3.1).

$$W = \frac{c}{2f_c} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad (3.1)$$

Onde, c é a velocidade da luz no vácuo.

Para o cálculo do comprimento da antena (L) é necessário primeiramente encontrar a permissividade relativa efetiva do substrato (ϵ_{ef}) mostrada na Equação (3.2) [43]

$$\epsilon_{ef} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(\frac{1}{\sqrt{1 + \frac{12h}{W}}} \right) \quad (3.2)$$

Onde,

ϵ_{ef} – função da constante dielétrica relativa do substrato (ϵ_r),

h – altura do substrato,

W – largura da antena.

Em razão dos efeitos de campo de fuga, o *patch* da antena de microfita retangular, aparenta eletricamente ser maior do que ele realmente é fisicamente. Por isso, o comprimento do *patch* é estendido por duas vezes o valor de ΔL mostrado na Equação (3.3) [40]

$$\Delta L = 0.412h \frac{(\epsilon_{ef} + 0,3) \left(\frac{W}{h} + 0,264 \right)}{(\epsilon_{ef} - 0,258) \left(\frac{W}{h} + 0,8 \right)} \quad (3.3)$$

Para o cálculo do comprimento efetivo (L_{ef}) do *patch* retangular utiliza-se a Equação (3.4) [40].

$$L_{ef} = \frac{1}{2f_c \sqrt{\epsilon_{ef}}} \quad (3.4)$$

Por fim, após obter os valores de ΔL e L_{ef} é possível encontrar o valor do comprimento do *patch* (L) por meio da Equação (3.5).

$$L = L_{ef} - 2\Delta L \quad (3.5)$$

3.2 Métodos de alimentação

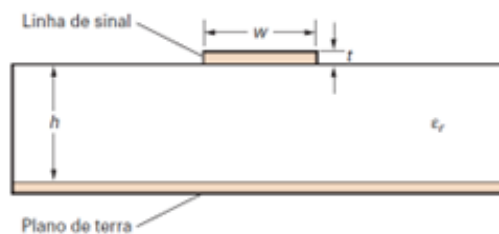
A escolha do tipo de alimentação interfere diretamente na impedância de entrada, largura de faixa de operação, eficiência e outro parâmetros. O ideal é que a alimentação tenha o mínimo de radiação espúria, uma vez que essa pode contribuir negativamente para o diagrama de radiação e consequentemente interferir em outros parâmetros da antena, e que resulte no máximo de eficiência na transferência de potência entre a alimentação e o *patch*, ou seja, que exista um bom casamento de impedância entre as partes.

Existem métodos de alimentação direta – em contato metálico entre as partes, e indireta – sem contato metálico entre as partes. A alimentação presente no trabalho é a linha de microfita, um dos tipos de alimentação direta.

3.2.1 Dimensionamento da linha de microfita

Uma linha de microfita é formada por uma fita metálica separada do plano terra por um material dielétrico, conforme mostra a figura a seguir.

Figura 22 - Configuração genérica de uma linha de microfita.



Fonte: [36].

Este tipo de alimentação possui a desvantagem de quanto maior a largura do substrato maior a radiação espúria. Entretanto, apresenta maior facilidade quanto à construção por estar no mesmo plano terra. Quanto ao casamento de impedância, para este trabalho, se dá por meio da manipulação de sua largura e ponto de inserção [44]. Para que a potência da antena seja transmitida com menos perdas da fonte à antena, é necessário que as impedâncias da transmissão e da entrada sejam iguais, pois assim resulta em um coeficiente de reflexão baixo ou nulo [45].

Dessa maneira, segundo Balanis, a largura da linha pode ser obtida por meio da equação a seguir, onde calcula-se a largura da linha (w_f) em função da impedância (Z_0), que geralmente

é considerada 50Ω . Neste modelo particular de microfita, a espessura t das camadas do metal e a dependência da propagação com frequência são desconsiderados [36,39].

$$Z_0 = \begin{cases} \frac{60}{\sqrt{\varepsilon_{ef}}} \ln \left(\frac{8h}{w_f} + \frac{w_f}{4h} \right) & \frac{w_f}{h} \leq 1 \\ \frac{120\pi}{\sqrt{\varepsilon_{ef} \left[\frac{w_f}{h} + 1,393 + 0,677 \ln \left(\frac{w_f}{h} + 1,44 \right) \right]}} & \frac{w_f}{h} > 1 \end{cases} \quad (3.6)$$

Onde,

Z_0 – impedância característica;

h – altura do substrato;

ε_{ef} – permissividade relativa efetiva do substrato;

w_f – dimensões da largura da linha.

Outra forma de dimensionamento da largura da linha de microfita, segundo Wortheworth, seria pela forma direta para um valor desejado de impedância já conhecida. Segundo ele, modelar as dimensões de uma linha de microfita para encontrar uma solução exata para a microfita é muito difícil, e para resolver este problema têm sido desenvolvido equações semiempíricas. Conforme mostra a Equação (3.7) [36,39].

$$\frac{w_f}{h} = \begin{cases} \frac{8e^A}{e^{2A} - 2} & \frac{w_f}{h} \leq 2 \\ \frac{2}{\pi} \left[B - 1 - \ln(2B - 1) + \frac{\varepsilon_r - 1}{2\varepsilon_r} \left(\ln(B - 1) + 0,39 - \frac{0,61}{\varepsilon_r} \right) \right] & \frac{w_f}{h} > 2 \end{cases} \quad (3.7)$$

Onde, as variáveis A e B são definidas nas Equações (3.8) e (3.9).

$$A = \frac{Z_0}{60} \sqrt{\frac{\varepsilon_r + 1}{2}} + \frac{\varepsilon_r - 1}{\varepsilon_r + 1} \left(0,23 + \frac{0,11}{\varepsilon_r} \right) \quad (3.8)$$

$$B = \frac{377\pi}{2Z_0\sqrt{\varepsilon_r}} \quad (3.9)$$

Segundo Milligan, à medida que a largura do *patch* (W) diminui, aumenta a impedância de entrada. Quando essa largura W se aproxima da dimensão de uma linha de alimentação (w_f), acontece de o *patch* deixar de ser um ressonador ou a linha de alimentação tornar-se muito estreita na tentativa de transformar a impedância [46].

O método utilizado para obter o comprimento da linha de microfita (l_f) neste trabalho utiliza-se como base o equacionamento (3.10), de forma a realizar o casamento de impedância

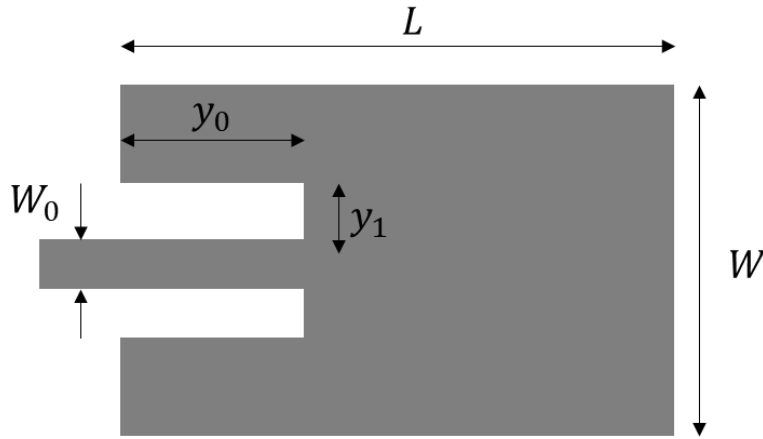
entre o *patch* e a linha de transmissão, o comprimento deve ser igual a um quarto do comprimento de onda no meio (Pozar) [36]. Contudo, há outros métodos para obter este comprimento. Segundo Milligan, os melhores resultados ocorrem para esse tamanho de comprimento de onda, pois permite que não haja desprendimento dos campos eletromagnéticos durante a transmissão e dessa maneira a linha não funcione como ressoador [46].

$$l_f = \frac{c}{4f_c\sqrt{\epsilon_{ef}}} \quad (3.10)$$

3.3 Dimensionamento do *Inset feed*

O *inset feed* é um método de casamento de impedância utilizado em antenas de microfita, onde é aplicado um par de fendas retangulares paralelas à linha de alimentação, e são dimensionadas com comprimento e largura conforme o equacionamento a seguir e possuem espessura iguais a da camada condutora do ressoador. Este método é bastante utilizado, uma vez que, permite um último ajuste na impedância de entrada da antena [36, 40]. Essa configuração está ilustrada na Figura 23.

Figura 23 - Antena de microfita com acréscimo de *inset feed*.



Fonte: Adaptado de [40].

As fendas podem ser compreendidas como um prolongamento da linha de transmissão de microfita permitindo o casamento de impedância mais simples [36]. Para o dimensionamento do *inset feed* tem-se a resistência de entrada (R_{in}), Equação (3.11), que é escrita em função do valor da porção que determina a variação em função de In_L [40].

$$R_{in}(In_L) = \frac{1}{2(G_1 \pm G_{12})} \cos^2\left(\frac{\pi}{L} In_L\right) \quad (3.11)$$

Onde G_1 é a condutância da primeira fenda irradiante e G_{12} é a condutância mútua entre as fendas de irradiação e são calculadas em função da relação dos campos eletromagnéticos irradiados pelo *patch* [47]. Para antenas de microfita, a condutância mútua é tipicamente menor quando comparada com condutância na abertura [40].

$$G_1 = \int_0^\pi \frac{\left[\frac{\sin\left(\frac{k_0 W}{2} \cos\theta\right)}{\cos\theta} \right]^2}{120\pi^2} \sin^3\theta d\theta \quad (3.12)$$

$$G_{12} = \int_0^\pi \frac{\left[\frac{\sin\left(\frac{k_0 W}{2} \cos\theta\right)}{\cos\theta} \right]^2}{120\pi^2} J_0(k_0 l \sin\theta) \sin^3\theta d\theta \quad (3.13)$$

Onde,

k_0 – número de onda no espaço livre,

W – largura da antena,

J_0 – função de Bessel de primeira espécie e ordem zero.

Dessa maneira, utilizando métodos matemáticos tem-se o comprimento do *inset* (In_L) definido pela Equação (3.14).

$$In_L = \frac{L}{\pi} \arccos[2R_{in}(G_1 \pm G_{12})] \quad (3.14)$$

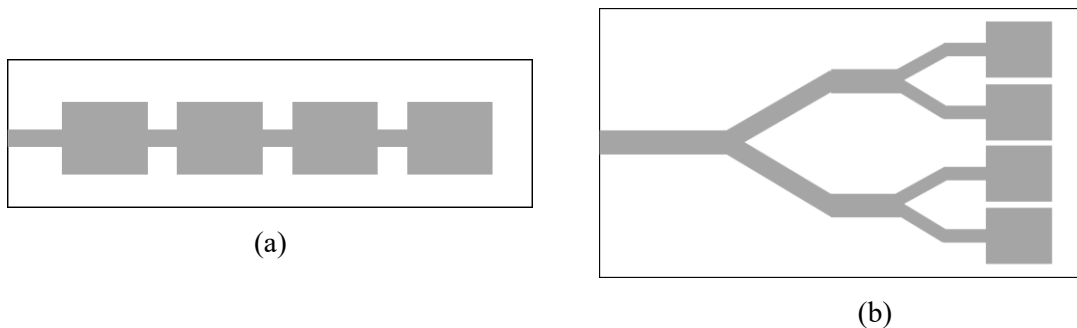
Para o cálculo da largura do *inset* (In_W) tem-se a Equação (3.15). Entretanto, dependendo da referência In_L pode variar, podendo ser da mesma largura da linha de transmissão (w_f), a metade da linha de transmissão ou uma razão de $w_f/40$. O dimensionamento de qual proporção utilizar pode ser feito por meio das simulações em *softwares* que utilizam como base os resultados encontrados na literatura em projetos parecidos ou calculado conforme equação a seguir [48, 49].

$$In_W = \frac{c}{\sqrt{2\varepsilon_{ef}}} \frac{4,65 \times 10^{-12}}{f} \quad (3.15)$$

3.4 Arranjo

Segundo Balanis, antenas de microfita podem ser utilizadas tanto como elementos isolados quanto em conjunto. Uma vez que, em conjunto podem melhorar a resposta de algum parâmetro específico quando comparado com a resposta de um único elemento. Além disso, um arranjo pode resultar também no aumento da diretividade e outros parâmetros que com uma antena é mais difícil obter. Os elementos do conjunto podem ser alimentados com a configuração por uma mesma linha (Figura 24 (a)) ou por múltiplas linhas (Figura 24 (b)) [40].

Figura 24 - Configurações de alimentação para conjuntos de plaquetas de microfita.



Fonte: Adaptado de [40].

Com o circuito de alimentação por arranjo de linhas afiladas obtêm-se divisões de potências de 2^n como ilustrado na Figura 25, onde para casar elementos de plaquetas de 100Ω utiliza-se uma entrada de 50Ω . Com este método de alimentação, coletiva, tem-se maior controle da alimentação de cada elemento, no quesito amplitude e fase, o que é ideal para conjuntos com varredura de fase, conjuntos de múltiplos feixes ou conjuntos de feixe formatado. Uma vez que, no presente trabalho foi considerado e utilizado o mesmo comprimento e o mesmo material para todos os elementos do arranjo [40].

Com o intuito de evitar lóbulos secundários e para fornecer amplitude uniforme ao longo da antena, é necessário que as antenas estejam suficientemente espaçadas [46]. O arranjo considerado no projeto é aquele em que a distribuição de abertura é uniforme e a que a potência é dividida igualmente em cada junção [50]. Geralmente quando o espaçamento entre os elementos do arranjo, centro a centro, é menor do que $\lambda/2$ implica em aparecimento de picos de feixe secundário, lobos de grade, o que atrapalha obter uma boa diretividade. No presente trabalho, foi considerado para o cálculo do espaçamento o λ como $0,75 \lambda_{guiado}$, conforme Equação 3.16, pois deve-se considerar o material do dielétrico [36, 44].

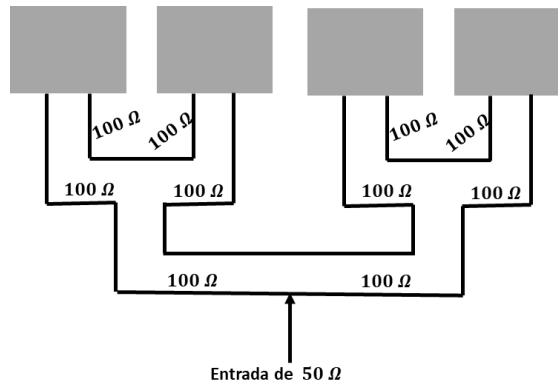
$$\lambda_g = \frac{\lambda}{\sqrt{\varepsilon_{ef}}} \quad (3.16)$$

Onde,

λ - Comprimento de onda no vácuo;

ε_{ef} - Permissividade relativa efetiva do substrato.

Figura 25 - Configuração do circuito de alimentação por arranjo de linhas afiladas.



Fonte: Adaptado de [40].

3.5 Desenvolvimento das antenas de microfita no simulador

Após realizar as implementações das equações no software Matlab, foi utilizado para projetar a antena a ferramenta de simulação computacional CST Studio Suite versão para estudante 2021. Este simulador possui configurações que permitem a análise para diferentes tipos de antenas, é capaz de mostrar resultados como gráfico de perda de retorno, frequência de operação do sistema, diagrama de irradiação entre outros. Entretanto, por ser uma versão gratuita, possui algumas limitações de uso, como por exemplo a quantidade de iterações.

Para modelar é necessário inicialmente inserir os valores dos parâmetros, o material do dielétrico, do condutor, a frequência e a geometria da antena no programa. Após essa primeira etapa, é ajustada a quantidade de iterações que poderá ser simulada. Em seguida é observado a resposta por meio dos diagramas e gráficos gerados.

Passo 1: Seleção do material

A placa utilizada nas simulações foi a *RT/Duroid 5880LZ* da Rogers Corporation. No *datasheet*, a constante dielétrica do substrato em torno, de $2,0 \pm 0,04$ e possui perda dielétrica

baixa, aproximadamente $\delta = \pm 0,0021$, sendo indicada para aplicações em alta frequência e banda larga [51]. Essa placa possui baixa densidade, é leve e pode-se considerar as propriedades elétricas uniforme ao longo da faixa de frequência. Com base nessas características, justifica-se seu uso para aplicações de alto desempenho e sensíveis ao peso [30].

Para o presente projeto foi estipulado que a espessura da placa seria de $35 \mu m$ e que a camada de substrato seria coberta de cobre. Quanto à altura do substrato, conforme o trabalho de Antônio Carlos de Oliveira Pedra, a recomendação é não utilizar o valor de espessura maior do que 0.1λ e após alguns testes optou-se por escolher $0,1 mm$ como espessura do dielétrico [52]. As demais dimensões do substrato foram calculadas utilizando esses parâmetros iniciais como base. E o resumo dos parâmetros relacionados ao material é apresentado no Quadro 3.

Quadro 3 -Parâmetros do material.

Parâmetro	Símbolo	Valor
Constante dielétrica do substrato	ϵ_r	2,0
Tangente de perda dielétrica	$\tan\delta$	0,0021
Espessura do cobre	t	$35\mu m$
Espessura do substrato	h	$0,1 mm$
Frequência de operação	f	$26 GHz$

Fonte: A autora.

Para calcular as dimensões do plano terra, para a primeira proposta, de uma antena, utilizou-se os seguintes equacionamentos adaptados de [42]:

$$w_g = (6h) + W \quad (3.17)$$

$$l_g = (6h) + L + l_f \quad (3.18)$$

Para as demais propostas, utilizou-se as Equações 3.17 e 3.18 como base e as dimensões foram ajustadas conforme o aumento da quantidade de antenas e espaçamento entre elas.

Passo 2: Configuração da alimentação

Para alimentação, foi utilizado o sistema por linha de microfita, a qual é constituída por uma fita condutora cuja largura é muito menor que a do *patch* conectada a ele. Esse tipo de alimentação normalmente possui uma alta impedância de entrada, para isso quanto mais próximo a entrada da linha de transmissão do centro da antena melhor para corrigir essa

característica. Com intuito de melhorar nesse ponto, foi utilizado a técnica de *inset-fed*, onde a largura do *inset* (In_W) é proporcional à largura da linha de transmissão (w_f), o comprimento do *inset* (In_L) está relacionado com o comprimento (L) da linha de transmissão e a resistência de entrada (R_{in}) [41, 47]. Os valores implementados para a simulação da antena, encontra-se no Quadro 4.

Quadro 4 -Parâmetros de alimentação e *inset-feed*.

Parâmetro	Símbolo	Valor
Largura antena	W	4,7106 mm
Comprimento antena	L	4.0269 mm
Largura inset	In_W	0,027194 mm
Comprimento inset	In_L	1,4086 mm
Largura linha de transmissão	w_f	0,32715 mm
Comprimento da linha de transmissão	l_f	2,0676mm
Resistência de entrada	R_{in}	50 Ω

Fonte: A autora.

Passo 3: Configuração das antenas propostas

Seguindo as equações descritas nesse capítulo foram realizados os cálculos no software *Matlab*. A seguir, os valores obtidos foram inseridos no simulador *CST Studio Suite* para realizar as análises das antenas de microfita.

Para as simulações das propostas, utiliza-se como base os valores dos parâmetros de configuração conforme Quadro 5. Contudo, alguns ajustes nas dimensões como no comprimento e largura do *inset* e comprimento da antena, foram necessários para melhorar o funcionamento das antenas.

Quadro 5 - Parâmetros para uma antena de microfita.

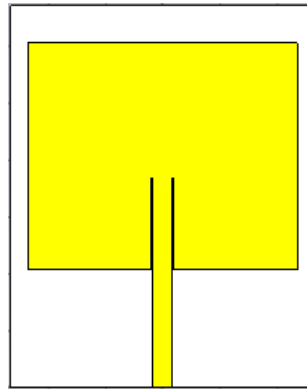
Parâmetro	Símbolo	Valor
Espessura da antena	t	0,035 mm
Espessura do substrato	h	0,1 mm
Comprimento da antena	L	4.0269 mm
Largura da antena	W	4,7106 mm
Comprimento do inset	In_L	1,4086 mm

Largura do inset	ln_w	0,027194 mm
Comprimento do plano terra	l_g	6,6945 mm
Largura do plano terra	w_g	5,3106 mm
Comprimento da linha de transmissão	l_f	2,0676 mm
Largura da linha de transmissão	w_f	0,32715 mm
Distância entre as antenas	r	1,4924 mm

Fonte: A autora.

A antena de microfita da proposta I é ilustrada na Figura 26.

Figura 26 - Antena de microfita da proposta I.

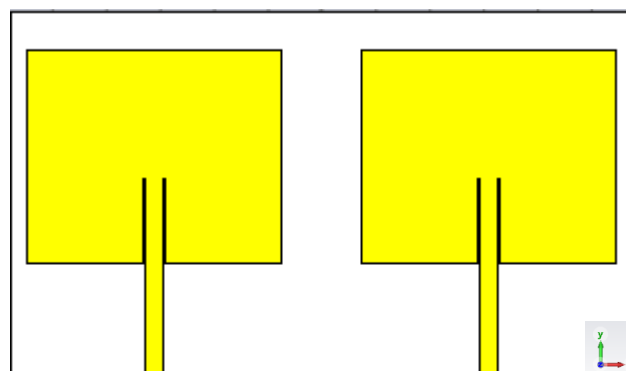


Fonte: A autora.



Para as demais antenas foi utilizado os parâmetros base de uma antena e incrementado do parâmetro r , que representa a distância entre as antenas. Foi alterado também as dimensões do comprimento e largura do plano terra proporcionalmente à quantidade de antenas no sistema. A antena de microfita da proposta II é ilustrada na Figura 27 e representa um sistema MIMO de duas antenas.

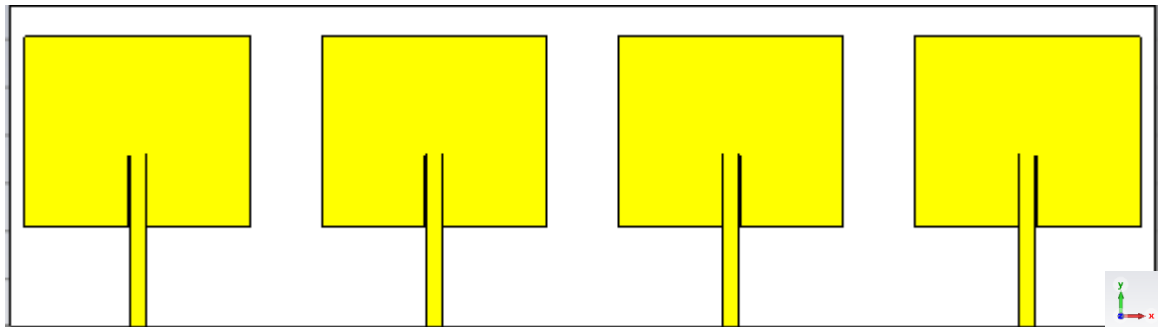
Figura 27 - Antena de microfita da proposta II.



Fonte: A autora.

A antena de microfita da proposta III é ilustrada na Figura 28 e representa um sistema MIMO de quatro antenas.

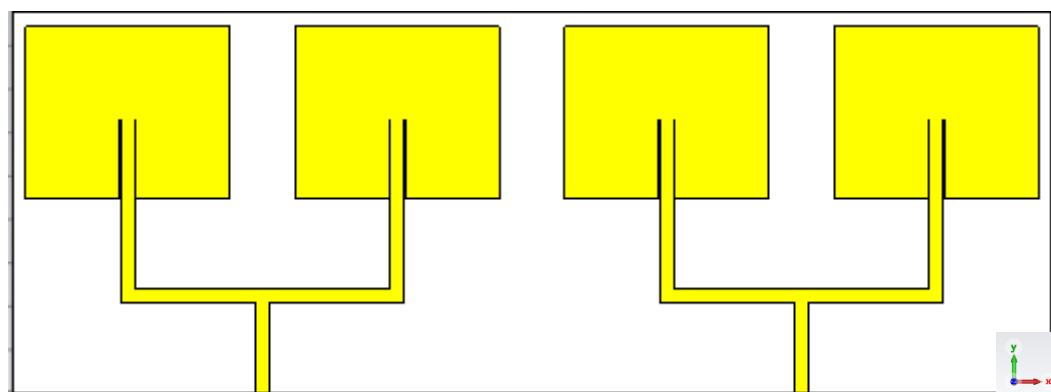
Figura 28 - Antena de microfita da proposta III.



Fonte: A autora.

A antena de microfita da proposta IV é ilustrada na Figura 29 e representa um arranjo MIMO 2X2.

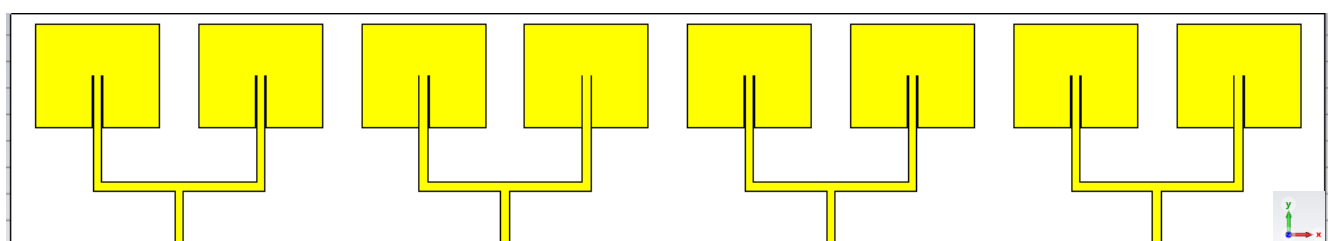
Figura 299 - Antena de microfita da proposta IV.



Fonte: A autora.

A antena de microfita da proposta V é ilustrada na Figura 30 e representa um arranjo MIMO 4X2.

Figura 30 - Antena de microfita da proposta V.



Fonte: A autora.

3.6 Definição das métricas avaliativas

Para descrever o desempenho de uma antena, definir alguns parâmetros é necessário para melhor entendimento de seu funcionamento. Como por exemplo, coeficiente de reflexão, ganho, largura de banda, diagrama de irradiação e diretividade.

3.6.1 Espalhamento

Para caracterizar um comportamento da rede de um circuito inserido em uma linha de transmissão, pode-se empregar parâmetros de rede para análise. Para caracterizar redes utiliza-se medições com portas terminadas em curto-circuito ou circuito aberto. Os estudos em alta frequência possuem uma dificuldade maior de obter um circuito em curto ou aberto ideal devido à existência da linha de transmissão e aos efeitos parasitas. Bem como podem danificar o dispositivo em teste em caso de reflexão completa da onda incidente [36].

Dessa maneira, os parâmetros de espalhamento (parâmetro S) diminuem essas preocupações, uma vez que, utilizam cargas casadas o que facilita a caracterização para análises. Neste caso, é considerado a métrica de espalhamento simples, que possui a mesma impedância característica (Z_0) em todas as portas da rede, representada pela razão entre as ondas de tensão que entram e saem das portas [36]. A métrica de espalhamento S_{ij} é definida como fração da onda de tensão entrando na porta V_j e saindo na porta V_i . É definida na Equação (3.19)

$$S_{ij} = \left. \frac{V_i^-}{V_j^+} \right|_{V_k^+ = 0, k \neq j} \quad (3.19)$$

3.6.2 Coeficiente de Reflexão

O coeficiente de reflexão (Γ) representa o quanto da amplitude de tensão da onda incidente é refletida para a fonte devido à uma inconstância de impedância [54]. Ele possui módulo constante em qualquer ponto da linha e a sua fase varia. Em qualquer ponto da linha de transmissão tem-se a razão entre as amplitudes das ondas de tensão incidente e refletida como definido na Equação (3.20) [54].

$$\Gamma = \frac{Z_{in} - Z_0}{Z_{in} + Z_0} \quad (3.20)$$

Onde,

Z_{in} – impedância de entrada da antena determinada de acordo com a frequência;

Z_0 – impedância característica da linha de transmissão conectada à antena.

Em estruturas de quatro portas, com saídas casadas, Γ é igual ao parâmetro de espalhamento S_{11} . Quando se trabalha com frequências que operam na banda larga, satisfazer o casamento de impedância, torna-se um pouco mais difícil. Nesse caso, o ideal é considerar leves descasamentos, o que resulta em uma diminuição da eficiência da antena [55].

3.6.3 Perda de retorno

Rede de duas portas, normalmente, são descritas por sua perda de retorno e inserção. Considerando um sistema onde há um casamento de impedância perfeito, o coeficiente de reflexão em uma porta específica será zero, enquanto a perda de retorno será infinita, conforme a Equação (3.21) [36].

$$RL_i = -20 \log \left| \frac{V_i^-}{V_j^+} \right| = -20 \log |\Gamma_i| \quad (3.21)$$

Onde,

RL_i — perda de retorno,

Γ_i — coeficiente de reflexão na i -ésima porta de uma rede.

Caso uma porta esteja completamente descasada, apresentando-se em curto ou circuito aberto, então não haverá nenhum sinal perdido, todo o sinal retornará e a perda de retorno será de 0 dB.

3.6.4 Largura de Banda

A largura de banda de uma antena é a faixa de frequências cujo desempenho da antena está de acordo com as características especificadas. A largura de banda pode ser considerada a faixa de frequência na qual as características da antena, como a impedância de entrada, largura de feixe, eficiência, entre outros possuem valores dentro de limites aceitáveis, definidos a partir dos correspondentes valores na frequência central [56].

Para o cálculo de antenas de banda larga, a equação é expressa pela relação entre frequência superior e a frequência inferior, tendo a frequência central como referência [39].

$$BW = 2 * \frac{f_2 - f_1}{f_2 + f_1} * 100 \quad (\%) \quad (3.22)$$

Onde,

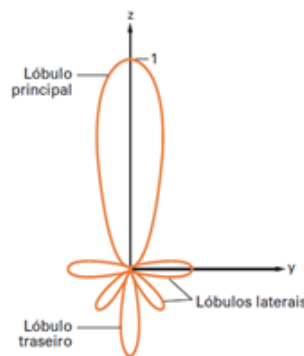
f_1 — frequência inferior;

f_2 — frequência superior.

3.6.5 Diagrama de radiação

O diagrama de radiação, ilustrado na Figura 31, de uma antena pode ser estabelecido como uma função matemática ou representação gráfica das propriedades de radiação da antena em função das coordenadas espaciais. Os diagramas de radiação normalmente indicam a intensidade de campo elétrico ou a intensidade de potência. Para que haja uma comunicação mais eficiente é necessário que um par de antenas transmissora – receptora compartilhe a mesma polarização [36,56].

Figura 31 - Diagrama de radiação.



Fonte: [36].

Na situação em que a antena irradia ondas eletromagnéticas igualmente em todas as direções, é considerada antena isotrópica. Em contrapartida, uma antena direcional irradia e recebe sinais com foco em alguma direção [36].

No diagrama de radiação, ilustrado na Figura 31, observa-se a existência de protuberâncias entre os nulos, que são chamadas de lóbulos, onde o lóbulo principal se estende na direção de radiação máxima e os demais são considerados lóbulos laterais e traseiros. Esses últimos proporcionam desvio da potência do feixe principal, nesse caso, para um bom projeto o ideal é minimizá-los [36,56].

3.6.6 Largura de feixe

Associado à análise do diagrama de radiação há um parâmetro conhecido como *largura de feixe*, esse parâmetro é definido como a separação angular entre dois pontos similares e em lados opostos ao máximo do diagrama. Em um gráfico de potência de antena, existem diferentes larguras de feixe, a mais utilizada é a *largura de feixe de meia potência (LFMP)*, que é definida como o ângulo entre as duas direções nas quais a intensidade de radiação é a metade do valor

máximo [56]. Conforme a largura de feixe diminui, o nível de lóbulos laterais aumenta e vice-versa.

Outra largura bastante utilizada é a separação angular entre os primeiros nulos do diagrama, que é referida como *largura de feixe entre nulos (LFEN)*. A largura de feixe de uma antena é usada para apresentar as capacidades de resolução da antena, ou seja, distinguir entre duas fontes radiantes [56].

3.6.7 Diretividade

Diretividade de uma antena segundo Balanis, é caracterizada como a “razão entre a intensidade de radiação em uma dada direção da antena e a intensidade de radiação média”. Basicamente a diretividade descreve somente as propriedades direcionais da antena [56]. A diretividade é definida na Equação (3.23).

$$D = \frac{4\pi U}{P_{rad}} \quad (3.23)$$

Onde,

U – intensidade de radiação (W/unidade de ângulo sólido),

P_{rad} – potência radiada total (W).

A diretividade em uma fonte isotrópica é unitária, uma vez que, a potência é radiada para todas as direções igualmente. Para análise de outros tipos de fontes, a diretividade máxima será sempre maior que a unidade. O termo diretividade expõe quão bem um elemento radiador direciona a energia em uma região específica [56].

3.6.8 Ganho

Outra medida utilizada para descrever o desempenho de uma antena é o *ganho*. Ele é relacionado à diretividade porque considera as propriedades direcionais da antena e a eficiência. O ganho, definido na Equação (3.24), é definido como a razão entre a intensidade de radiação em uma região específica, e a intensidade de radiação que seria obtida caso a potência de entrada fosse radiada isotropicamente [56].

$$Ganho = 4\pi \frac{U(\theta, \phi)}{P_{in}} \text{ (adimensional)} \quad (3.24)$$

Onde,

$U(\theta, \phi)$ – intensidade de radiação em uma dada direção contida na componente de campo E_θ e na componente de campo E_ϕ ,

P_{in} – potência total de entrada.

Capítulo 4

DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Esse Capítulo apresenta os resultados obtidos da simulação das propostas de antena e arranjo de antenas equacionadas anteriormente. Além disso, esses resultados são interpretados e discutidos para o entendimento desse trabalho de conclusão de curso.

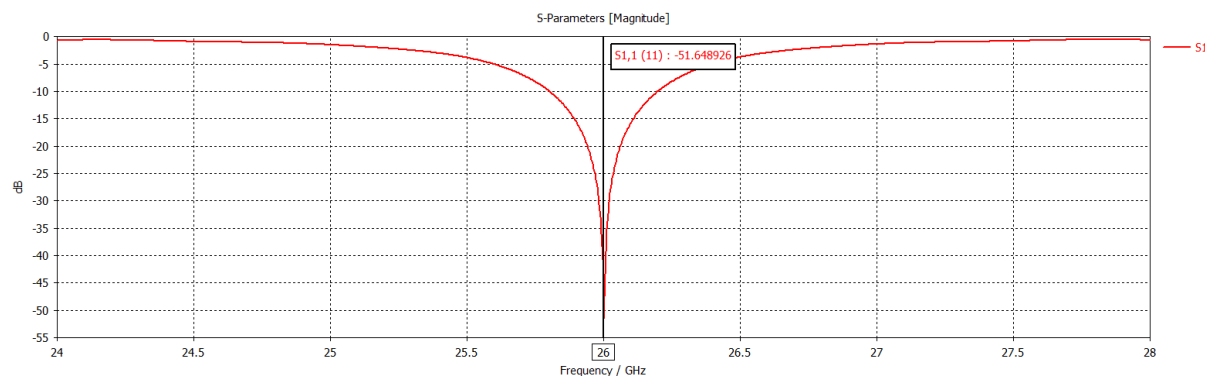
Para as três propostas apresentadas no Capítulo 3 são apresentados os parâmetros avaliativos: espalhamento, diagrama de radiação 3D. No diagrama de radiação são destacados os valores de diretividade, ganho e eficiência.

4.1 Resultados da Proposta I

Nessa seção são apresentados os resultados obtidos da antena de microfita da proposta I determinada conforme os parâmetros apresentados no Quadro 5.

A Figura 32 ilustra o resultado do parâmetro avaliativo de espalhamento $S_{1,1}$. Observa-se que na frequência de projeto, 26 GHz, o parâmetro $S_{1,1}$ apresenta valor de $-51,648$ dB.

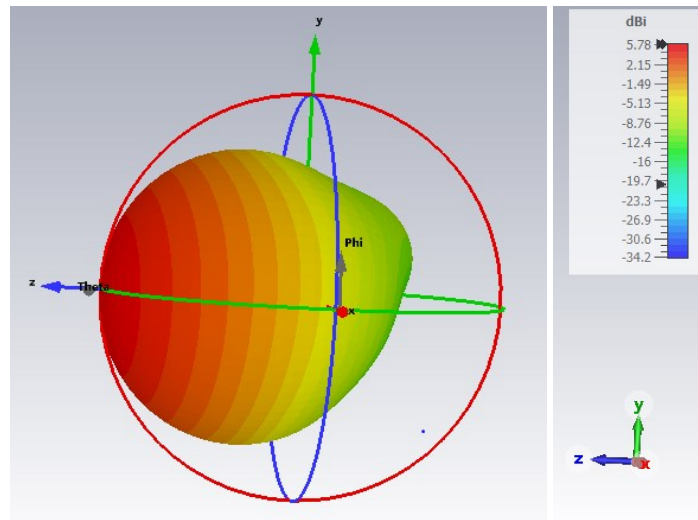
Figura 32 - Parâmetro avaliativo $S_{1,1}$ da Proposta I.



Fonte: A autora.

A Figura 33 ilustra o diagrama de radiação 3D e, a Tabela 3 mostra os resultados numéricos dos parâmetros ganho, diretividade, eficiência de radiação e eficiência total.

Figura 33 - Diagrama de radiação 3D da Proposta I.



Fonte: A autora.

Tabela 3 -Resultados obtidos do diagrama de radiação da Proposta I.

Parâmetro	
Ganho	5,784 dBi
Diretividade	7,341 dBi
Eficiência de radiação	-1,558 dB
Eficiência total	-1,569 dB

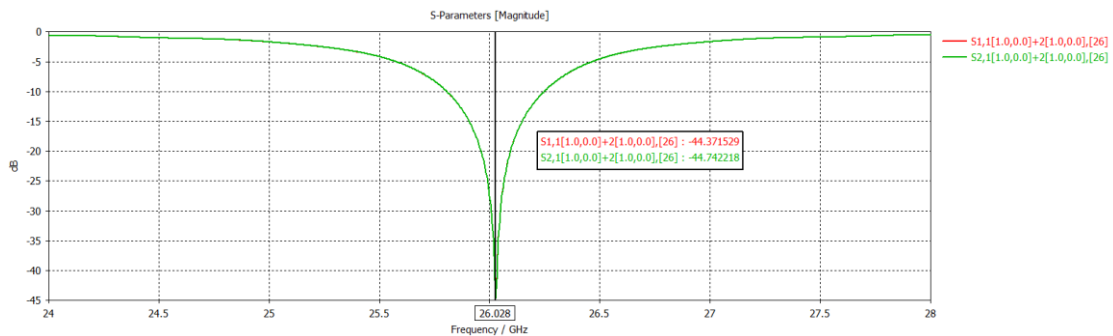
Fonte: A autora.

4.2 Resultados da Proposta II

Os resultados obtidos do sistema MIMO de duas antenas de microfita da proposta II determinada conforme os parâmetros adaptados de configuração do Quadro 5 são apresentados nessa seção.

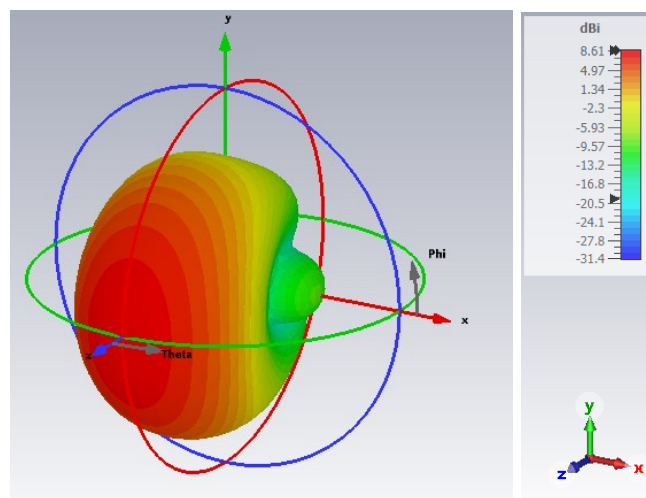
A Figura 34 ilustra o resultado do parâmetro avaliativo de espalhamento $S_{1,1}$ e $S_{2,1}$. Observe que na frequência de projeto, 26,028 GHz, os parâmetros espalhamento $S_{1,1}$ e $S_{2,1}$ apresentam os valores de $-44,37$ dB e $-44,74$ dB, respectivamente.

A Figura 35 ilustra o diagrama de radiação 3D e, a Tabela 4 mostra os resultados numéricos dos parâmetros ganho, diretividade, eficiência de radiação e eficiência total para um sistema MIMO de duas antenas.

Figura 30 - Parâmetros avaliativo $S_{1,1}$ e $S_{2,1}$ da Proposta II.

Fonte: A autora.

Figura 31 - Diagrama de radiação 3D da Proposta II.



Fonte: A autora.

Tabela 4-Resultados obtidos do diagrama de radiação da Proposta II.

Parâmetro	
Ganho	8,611 dBi
Diretividade	9,929dBi
Eficiência de radiação	-1,318 dB
Eficiência total	-1,363 dB

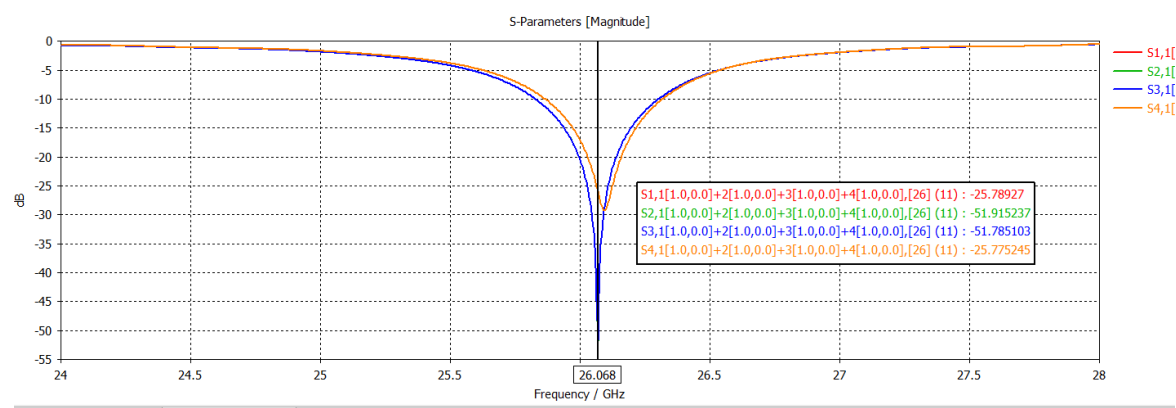
Fonte: A autora.

4.3 Resultados da Proposta III

Os resultados obtidos do sistema MIMO de quatro antenas de microfita da proposta III com os parâmetros adaptados de configuração do Quadro 5 são apresentados nessa seção.

A Figura 36 ilustra o resultado do parâmetro avaliativo de espalhamento $S_{1,1}$, $S_{2,1}$, $S_{3,1}$ e $S_{4,1}$.

Figura 326 - Parâmetros avaliativos $S_{1,1}$, $S_{2,1}$, $S_{3,1}$ e $S_{4,1}$ da Proposta III.

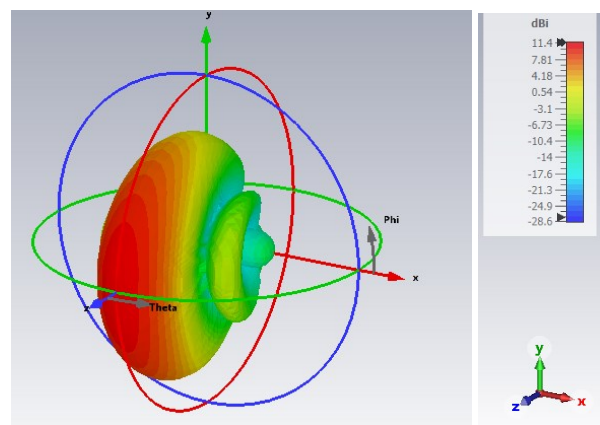


Fonte: A autora.

Observe que na frequência de projeto, 26,068 GHz, os parâmetros espalhamento $S_{1,1}$, $S_{2,1}$, $S_{3,1}$ e $S_{4,1}$ apresentam os valores de $-25,78\text{ dB}$, $-51,94\text{ dB}$, $-51,78\text{ dB}$ e $-25,77\text{ dB}$, respectivamente.

A Figura 37 ilustra o diagrama de radiação 3D e, a Tabela 5 mostra os resultados numéricos dos parâmetros ganho, diretividade, eficiência de radiação e eficiência total para um sistema MIMO de quatro antenas.

Figura 37 - Diagrama de radiação 3D da Proposta III.



Fonte: A autora.

Tabela 5-Resultados obtidos do diagrama de radiação da Proposta III.

Parâmetro	
Ganho	11,45 dBi
Diretividade	12,72 dBi
Eficiência de radiação	-1,274 dB
Eficiência total	-1,448 dB

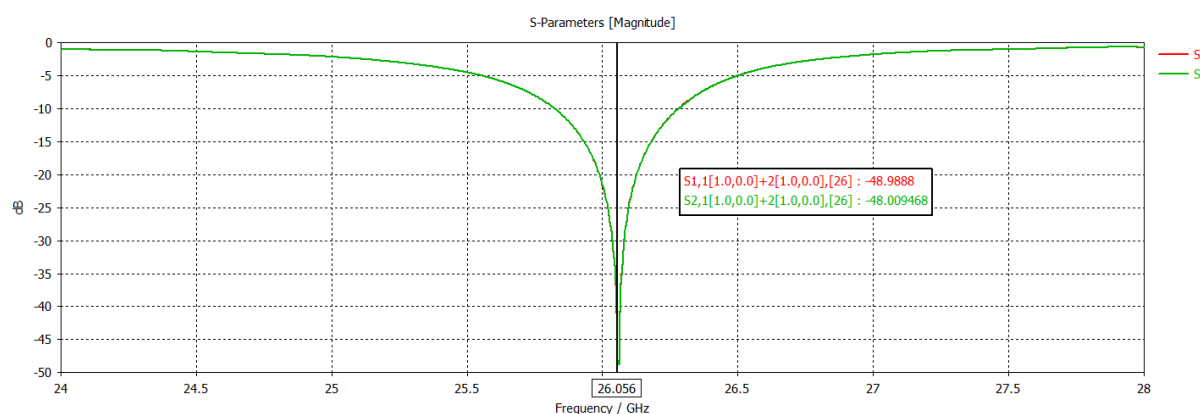
Fonte: A autora.

4.4 Resultados da Proposta IV

Os resultados obtidos do sistema de arranjo MIMO 2x2 de microfita da proposta IV determinada conforme os parâmetros adaptados de configuração do Quadro 5 são apresentados nessa seção.

A Figura 38 ilustra o resultado do parâmetro avaliativo de espalhamento $S_{1,1}$ e $S_{2,1}$.

Figura 338 - Parâmetros avaliativo $S_{1,1}$ e $S_{2,1}$ da Proposta IV.

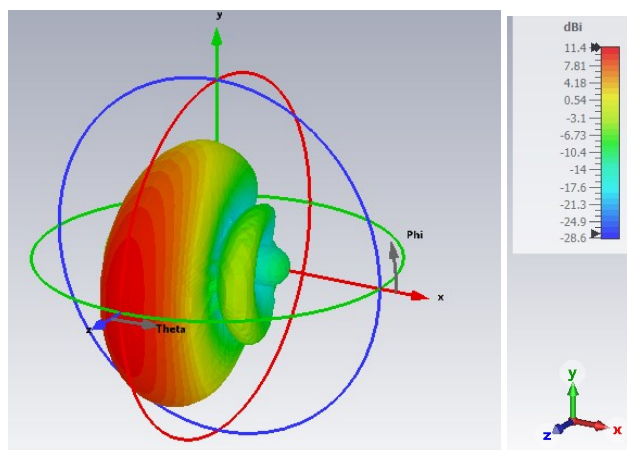


Fonte: A autora.

Observe que na frequência de projeto, 26,056 GHz, os parâmetros espalhamento $S_{1,1}$ e $S_{2,1}$ apresentam os valores de $-48,98 \text{ dB}$ e $-48,00 \text{ dB}$, respectivamente.

A Figura 39 ilustra o diagrama de radiação 3D e, a Tabela 6 mostra os resultados numéricos dos parâmetros ganho, diretividade, eficiência de radiação e eficiência total para um sistema de arranjo MIMO 2x2.

Figura 39 - Diagrama de radiação 3D da Proposta IV.



Fonte: A autora.

Tabela 6-Resultados obtidos do diagrama de radiação da Proposta IV.

Parâmetro	
Ganho	11,28 dBi
Diretividade	12,89 dBi
Eficiência de radiação	−1,609 dB
Eficiência total	−1,721 dB

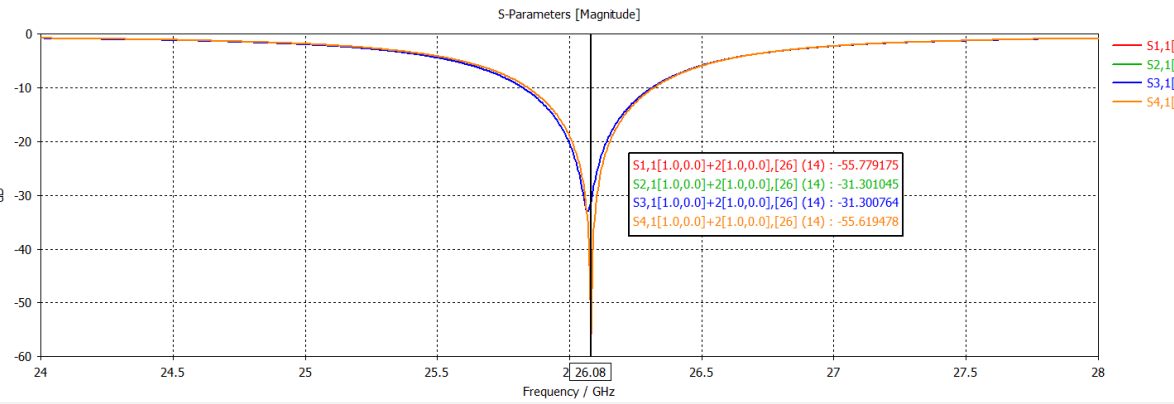
Fonte: A autora.

4.5 Resultados da Proposta V

Os resultados obtidos do sistema de arranjo MIMO 4x2 de microfita da proposta IV determinada conforme os parâmetros adaptados de configuração do Quadro 5 são apresentados nessa seção.

A Figura 40 ilustra o resultado do parâmetro avaliativo de espalhamento $S_{1,1}$, $S_{2,1}$, $S_{3,1}$ e $S_{4,1}$.

Figura 40 - Parâmetros avaliativo $S_{1,1}$, $S_{2,1}$, $S_{3,1}$ e $S_{4,1}$. da Proposta V.

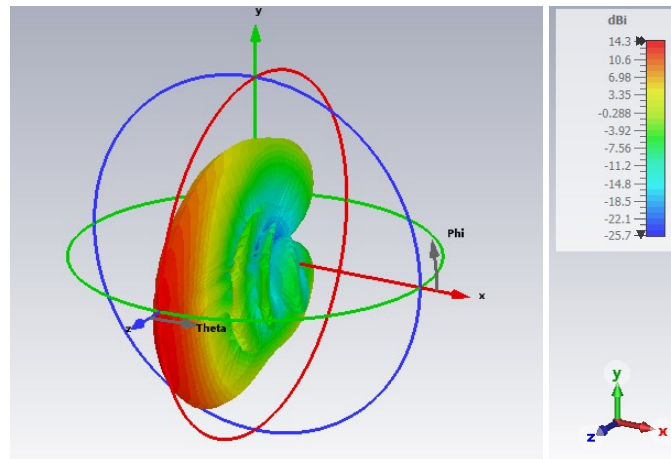


Fonte: A autora.

Observe que na frequência de projeto, 26,08 GHz, os parâmetros de espalhamento $S_{1,1}$, $S_{2,1}$, $S_{3,1}$ e $S_{4,1}$ apresentam os valores de −55,77 dB, −31,30 dB, −31,30 dB e −55,61 dB, respectivamente.

A Figura 41 ilustra o diagrama de radiação 3D e, a Tabela 7 mostra os resultados numéricos dos parâmetros ganho, diretividade, eficiência de radiação e eficiência total para um sistema de arranjo MIMO 4x2.

Figura 41 - Diagrama de radiação 3D da Proposta V.



Fonte: A autora.

Tabela 7-Resultados obtidos do diagrama de radiação da Proposta V.

Parâmetro	
Ganho	14,26 dBi
Diretividade	15,81 dBi
Eficiência de radiação	-1,554 dB
Eficiência total	-1,698 dB

Fonte: A autora.

4.4 Análise Comparativa dos Resultados das Propostas I, II, III, IV e V

A frequência de ressonância é considerada no ponto onde a perda de retorno apresenta o menor valor possível, ou seja, ponto ótimo de operação. Foi observado que os sistemas das antenas propostas conseguiram atingir a faixa de frequência projetada de 26 GHz. Assim, na proposta I, a frequência de ressonância é 26 GHz e nas propostas II é 26,028 GHz, III é 26,068 GHz, IV é 26,056 GHz e V é 26,08 GHz.

Em termos práticos, uma antena transmissora ou receptora, deve apresentar o parâmetro de espalhamento menor ou igual a -10 dB. De acordo com resultados obtidos nesse trabalho, todas as propostas atenderam a recomendação. A partir desse parâmetro, foi determinada a largura de banda das antenas. Para as antenas de microfita avaliadas nas Propostas I, II, III, IV e V tem-se os seguintes valores de largura de banda: 1,58 % ($f_{\min} = 25,794 \text{ GHz}$ e $f_{\max} = 26,206 \text{ GHz}$), 1,70 % ($f_{\min} = 25,796 \text{ GHz}$ e $f_{\max} = 26,24 \text{ GHz}$), 1,94 % ($f_{\min} = 25,819 \text{ GHz}$ e $f_{\max} = 26,325 \text{ GHz}$), 1,78 % ($f_{\min} = 25,82 \text{ GHz}$ e $f_{\max} = 26,285 \text{ GHz}$) e 1,97 % ($f_{\min} = 25,817 \text{ GHz}$ e $f_{\max} = 26,332 \text{ GHz}$).

Conforme o Quadro 6 é possível classificar a largura de banda de acordo com os seguintes intervalos [58 - 60]. Dessa maneira, utilizando o equacionamento da largura de banda fracionária pode-se concluir que todas as propostas estão dentro da faixa de banda larga.

Quadro 6- Esquema de classificação modificado para dispositivos/sinais com base na largura de banda.

Tipo de Banda		Largura de banda fracionária	Relação de banda
Radar/Comunicações	Interferência eletromagnética	$B_F = 2 \frac{f_{m\acute{a}x} - f_{m\acute{i}n}}{f_{m\acute{a}x} + f_{m\acute{i}n}}$	$b_r = \frac{f_{m\acute{a}x}}{f_{m\acute{i}n}}$
Banda estreita (<i>NB</i>)	Hipobanda (<i>NB</i>)	$0.00 < B_F \leq 0.01$	$0.00 < b_r \leq 1.01$
Banda larga (<i>WB</i>)	Mesobanda (<i>MB</i>)	$0.01 < B_F \leq 0.25$	$1.01 < b_r \leq 1.29$
Banda ultra larga (<i>UWB</i>)	Sub-hiperbanda (<i>SHB</i>)	$0.25 < B_F \leq 1.50$	$1.29 < b_r \leq 7.00$
	Hiperbanda(<i>HB</i>)	$1.50 < B_F \leq 2.00$	$7.00 < b_r < \infty$

Fonte: Adaptado de [58].

O diagrama de radiação é importante na avaliação do desempenho porque nele são obtidos os parâmetros de ganho e eficiência. Para as cinco propostas, os valores obtidos de ganho foram, respectivamente, 5,784 *dB*i; 8,611 *dB*i; 11,45 *dB*i; 11,28 *dB*i e 14,26 *dB*i. E a eficiência total para as cinco propostas são -1,569 *dB*; -1,363 *dB*; -1,448 *dB*; -1,721 *dB* e -1,698 *dB*. Observando esses valores obtidos, conclui-se que o sistema de arranjo MIMO 4 X 2 apresenta o maior valor de ganho e o sistema de arranjo MIMO 2 X 2 apresenta o maior valor de eficiência em relação as outras propostas analisadas.

Analisando o parâmetro diretividade, para as cinco propostas, têm-se os seguintes valores: 7,341 *dB*i; 9,929 *dB*i; 12,72 *dB*i; 12,89 *dB*i e 15,81 *dB*i. Observando esses valores obtidos conclui-se que o sistema de arranjo MIMO 4 x 2 apresenta maior diretividade dentre as antenas propostas.

4.5 Análise Comparativa das Antenas no Sistema MIMO

Observando os valores obtidos mostrados na Tabela 8, conclui-se que todas a propostas atingiram a faixa de frequência projetada. Em relação aos parâmetros ganho e diretividade, observou-se uma diferença de aproximadamente 3*dB* entre as propostas avaliadas e a Proposta III apresentou os melhores resultados.

Comparando os valores obtidos de eficiência, a Proposta I apresentou o melhor resultado. Em relação ao parâmetro largura de banda, observou-se que todas as propostas estão na mesma faixa de avaliação, contudo a Proposta III apresentou um valor maior de largura. Dessa maneira, as análises mostraram que a utilização dos sistemas MIMO apresentam melhorias significativas nos resultados.

Tabela 8-Análise comparativa dos resultados para Propostas I, II e III.

Parâmetro	Proposta I	Proposta II	Proposta III
Frequência de operação	26 GHz	26,028 GHz	26,068 GHz
Ganho	5,784 dB	8,611 dBi	11,45 dBi
Diretividade	7,341 dBi	9,929dBi	12,72 dBi
Eficiência Total	-1,558 dB	-1,318 dB	-1,274 dB
Eficiência Radiação	-1,569 dB	-1,363 dB	-1,448 dB
Largura de Banda	1,5846 %	1,7065%	1,9408 %

Fonte: A autora.

4.6 Análise Comparativa das Antenas no Sistema MIMO e dos Arranjos MIMO

Outra análise pertinente é a comparação das seguintes propostas: A Tabela 9 apresenta os resultados das propostas II e IV que possuem a mesma quantidade de portas, ou seja, proporcionam a mesma diversidade. A Tabela 10 apresenta os resultados das propostas III e V possuem um sistema MIMO associado ao arranjo.

Tabela 9-Análise comparativa dos resultados para Propostas II e IV.

Parâmetro	Proposta II	Proposta IV
Frequência de operação	26,028 GHz	26,056 GHz
Ganho	8,611 dBi	11,28 dBi
Diretividade	9,929dBi	12,89 dBi
Eficiência Total	-1,318 dB	-1,609 dB
Eficiência Radiação	-1,363 dB	-1,721 dB
Largura de Banda	1,7065%	1,7849%

Fonte: A autora

Com base na Tabela 9 conclui-se que ambas as propostas estão operando na faixa de frequência de 26 GHz . O sistema de arranjo MIMO 2 X 2 obteve um aumento de 2,81 dBi no ganho. Ressaltando que um dos principais objetivos ao associar o arranjo ao sistema MIMO é o fato de proporcionar maior ganho.

Tabela 10-Análise comparativa dos resultados para Propostas III e V.

Parâmetro	Proposta III	Proposta V
Frequência de operação	26,068 GHz	26,08 GHz
Ganho	11,45 dBi	14,26 dBi
Diretividade	12,72 dBi	15,81 dBi
Eficiência Total	-1,274 dB	-1,554 dB
Eficiência Radiação	-1,448 dB	-1,698 dB
Largura de Banda	1,9408 %	1,9751%

Fonte: A autora

Baseado nos resultados mostrados na Tabela 10, conclui-se que as propostas estão operando na faixa de frequência de 26 GHz . O sistema de arranjo MIMO 4 X 2 apresentou melhora significativa nos parâmetros analisados. Assim, comprova-se que a utilização do arranjo melhora a resposta do sistema, principalmente ao ser associado ao sistema de múltiplas antenas.

Capítulo 5

CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 Conclusões

Tendo em vista o crescimento das tecnologias móveis no mundo, principalmente agora com a implementação do 5G, torna-se necessário a criação de métodos para melhorar a performance de atendimento à rede, proporcionando uma melhor experiência ao usuário. A utilização da quinta geração para transmissão de dados veio para melhorar a conectividade entre pessoas e “coisas”. Dessa forma, facilita o dia a dia das pessoas e empresas.

Como sugerido por representantes de empresas que irão implantar o 5G, a utilização da tecnologia MIMO e, suas variações, pode promover maior largura de banda, aumento da capacidade do canal, maior diretividade entre outros quesitos que tornarão a experiência do 5G cada vez melhor. Nesse sentido, esse trabalho avaliou alguns sistemas MIMO e o sistema MIMO associado ao arranjo de antenas de microfita. Além disso, comparou os resultados variando a quantidade de elementos no sistema.

De acordo com os resultados obtidos nas simulações, foi possível concluir que as Propostas IV e V, sistema de múltiplas antenas em conjunto ao arranjo, apresentaram os melhores resultados nos quesitos avaliados. Essa afirmativa baseia-se, por exemplo, nos valores de diretividade encontrados para a primeira antena (7,341 *dB*i) e para a última antena proposta (15,81 *dB*i). Assim como, em relação ao quesito ganho, observou-se 5,784 *dB*i da Proposta I (uma antena) e 14,26 *dB*i da Proposta V (arranjo MIMO 4 X 2). Esse aumento tende a ser amplificado com a utilização de mais antenas, em larga escala, juntamente com métodos como o *beamforming*, que auxilia no direcionamento do feixe para um usuário específico.

Esses resultados foram satisfatórios para comprovar que a utilização da técnica de múltiplas antenas de entrada e múltiplas antenas de saída e arranjos, auxiliam na melhora da capacidade do canal, ganho, largura de banda, diretividade e outros fatores. Dessa maneira, justificando sua utilização na implementação da tecnologia 5G.

5.2 Trabalhos Futuros

O objetivo do trabalho de comprovar a influência de um arranjo de antenas aplicado ao sistema MIMO foi alcançado. Neste projeto, adotou-se a utilização de antenas de microfita retangular com alimentação coletiva e para o casamento de impedância foi considerado o método de inserção, *inset feed*. Entretanto, a teoria de antenas com múltiplas entradas e múltiplas saídas pode ser testada com variações da geometria da antena, do material do *patch*, bem como o método de casamento de impedância e tipo de alimentação do arranjo.

REFERÊNCIAS

- [1] **Balanço da Anatel mostra crescimento expressivo da banda larga.** Ponto ISP, 10 fev. 2022. Disponível em: <<https://www.pontoisp.com.br/balanco-da-anatel-mostra-crescimento-expressivo-da-banda-larga/>>. Acesso em: 8 jul. 2022
- [2] **Setor da Tecnologia da Informação cresce no Brasil de forma consistente desde maio de 2020.** Disponível em: <<https://g1.globo.com/jornal-nacional/noticia/2022/03/16/setor-da-tecnologia-da-informacao-cresce-no-brasil-de-forma-consistente-desde-maio-de-2020.ghtml>>. Acesso em: 8 jul. 2022.
- [3] **Setor de TI no Brasil deve crescer 14% em 2022, diz associação.** Disponível em: <<https://www.poder360.com.br/economia/setor-de-ti-no-brasil-deve-crescer-14-em-2022-diz-associacao/>>. Acesso em: 9 jul. 2022.
- [4] **Setores de Tecnologia e Telecom devem crescer 8,2% no Brasil em 2022.** Disponível em: <<https://noomis.febraban.org.br/blog/setores-de-tecnologia-e-telecom-devem-crescer-8-2-no-brasil-em-2022>>. Acesso em: 9 jul. 2022.
- [5] **Anatel aprova prazo adicional de 60 dias para início do 5G nas capitais.** JOTA Info, 7 jun. 2022. Disponível em: <<https://www.jota.info/opiniao-e-analise/colunas/coluna-do-tracking/anatel-aprova-prazo-adicional-de-60-dias-para-inicio-do-5g-nas-capitais-07062022>>. Acesso em: 9 jul. 2022
- [6] **Futuro das redes 5G está na tecnologia Massive MIMO.** Disponível em: <<https://www.convergenciadigital.com.br/Internet-Movel/Futuro-das-redes-5G-esta-na-tecnologia-Massive-MIMO-60671.html>>. Acesso em: 9 jul. 2022.
- [7] **5 tendências tecnológicas pré e pós pandemia.,** [s.d.]. Disponível em: <<https://deolhonofuturo.uninter.com/tendencias-tecnologicas-pandemia/>>. Acesso em: 10 jul. 2022
- [8] **Cisco Annual Internet Report - Cisco Annual Internet Report (2018–2023) White Paper.** Disponível em: <<https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/executive-perspectives/annual-internet-report/white-paper-c11-741490.html>>. Acesso em: 10 jul. 2022.
- [9] LEAL, Israel; ALENCAR, Marcelo; LOPES, Waslon. **Capacidade de Canal MIMO Aplicada à Miniaturização de Antenas em Microfita Usando o Algoritmo PSO.**

- In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TELECOMUNICAÇÕES E PROCESSAMENTO DE SINAIS, n. XXXVIII. 2020, FLORIANÓPOLIS, 2020.
- [10] SILVA, Jefferson Costa. **Análise experimental do efeito de diversas configurações de “inset feed” na alimentação de antenas planares dos tipos retangular, circular e triangular.** In: DIVULGAÇÃO CIENTÍFICA E TECNOLÓGICA DO IFPB, n. 24. 2014.
- [11] **Tecnologia 5G.** Disponível em: <<https://www.gov.br/anatel/pt-br/assuntos/5G/tecnologia-5g>>. Acesso em: 11 jul. 2022.
- [12] **Estudo aponta que indústria de tecnologia cresceu mais de 20% durante pandemia. Decision Report,** 5 ago. 2021. Disponível em: <<https://www.decisionreport.com.br/destaque/estudo-aponta-que-industria-de-tecnologia-cresceu-mais-de-20-durante-pandemia/>>. Acesso em: 11 jul. 2022
- [13] FARIAS, Guilherme Francisco de. **5G – Redes de comunicações móveis de quinta geração: Evolução, tecnologia, aplicações e mercado.** 2019 Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade do Sul de Santa Catarina.
- [14] **Release 10.3GPP A Global Initiative. The Mobile Broadband Standard** Disponível em: <<https://www.3gpp.org/specifications/releases/70-release-10>>>. Acesso em: out. 2019.
- [15] **Release 14.3GPP A Global Initiative. The Mobile Broadband Standard** Disponível em: <<https://www.3gpp.org/release-14>>> Acesso em: out. 2019.
- [16] **Release 15.3GPP A Global Initiative. The Mobile Broadband Standard** Disponível em: <<https://www.3gpp.org/release-15>>> Acesso em: out. 2019.
- [17] **Release 16.3GPP A Global Initiative. The Mobile Broadband Standard** Disponível em: <<https://www.3gpp.org/release-16>>> Acesso em: out. 2019.
- [18] MARTINS, FRANCISCO TACIZIO. **Tecnologia 5G – O futuro das redes móveis.** 2016 Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Tecnológica Federal do Paraná.
- [19] **5G Release 17 timeline has been finally agreed.** 21 dez. 2020 Disponível em: <<https://www.5gworldpro.com/blog/2020/12/21/5g-release-17-timeline-has-been-finally-agreed/>>. Acesso em: 17 jul. 2022.
- [20] PEREIRA ALVES, Mário Henrique; LEONEL MENDES, Luciano . **Levantamento dos cenários de utilização das redes 5G no Brasil.** In: XXXIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TELECOMUNICAÇÕES. 2015.
- [21] BUENO, Henrique de Oliveira. **Análise de desempenho de uma transmissão downlink em rede 5G segundo modelo de canal 3GPP Release 15.** 2019 Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Federal de Uberlândia.

- [22] **Leilão do 5G enfim ocorreu: veja o que vai para Claro, TIM, Vivo e mais.** Disponível em: <<https://tecnoblog.net/especiais/leilao-do-5g-enfim-ocorreu-veja-o-que-vai-para-claro-tim-vivo-e-mais/>>. Acesso em: 17 jul. 2022.
- [23] HAYKIN, Simon. **Sistemas de comunicação: Analógicos e digitais.** 4 ed. Bookman, 2004. 837 p.
- [24] KESSLER, Marcelo Silveira. **Estudo de múltiplas antenas para sistemas de comunicação móvel.** 2009 Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade de Brasília.
- [25] LESSA, Carmen Lúcia Avelar. **Esquema para transmissão utilizando MIMO com cooperação de usuários.** 2011 Dissertação - Universidade Estadual de Campinas.
- [26] SHAH, Chirag R.. **Performance and Comparative Analysis of SISO, SIMO, MISO, MIMO.** In: INTERNATIONAL JOURNAL OF WIRELESS COMMUNICATION AND SIMULATION, n. Volume 9. 2017. Research India Publications, p. 1-14.
- [27] BALA, Diponkor et al. **Study the Performance of Capacity for SISO, SIMO, MISO and MIMO in Wireless Communication.** In: JOURNAL OF NETWORK AND INFORMATION SECURITY, n. 8. 2020.
- [28] PERRI, Eduardo B.. **Smart Antennas: Antenas Inteligentes Aplicadas à Telefonia Celular.** Teleco - Inteligência em Telecomunicações. 2009. Disponível em: <https://docplayer.com.br/56784442-Smart-antennas-antenas-inteligentes-aplicadas-a-telefonica-celular.html>. Acesso em: 18 jul. 2022.
- [29] LEMES, Dimas Augusto Mendes. **Otimização da Capacidade Soma de Canal de Sistemas MIMO Multi-usuário para Arranjos Lineares e Retangulares na Estação Base.** 2018 Dissertação - Universidade Estadual de Campinas.
- [30] ARAÚJO, José Bruno Oliveira. **Projeto de antenas de microfita de padrões elíptico e retangular aplicadas à tecnologia 5G.** 2017 Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Federal Fluminense.
- [31] GOMES, Daniely; FACINA, Michelle. **Comunicações das Redes 6G.** Brasil 6G. Dis <https://inatel.br/brasil6g/images/images/workshop/documentos/comunicacoes.pdf>. Acesso em: 18 jul. 2022.
- [32] LAGES, André Vinícius de Souza. **Antena MIMO Ultra Banda Larga para Comunicações Móveis.** 2015 Dissertação - Universidade Federal do Pará.
- [33] PUC-Rio Certificação Digital N°0016247/CA. **Aplicações de arranjos de antenas às comunicações móveis,** p. 35-43. Disponível em: https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/3502/3502_3.PDF. Acesso em: 19 jul. 2022.

- [34] TRANS-TEL. **Utilização de Antenas de Transmissão:** Arranjo de Antenas. Trans-Tel, p.28-40. Disp em: http://www.transtelconti.com.br/pdf/cursoantenas/curso_cap3.pdf. Acesso em: 19 jul. 2022.
- [35] ANDRADE, Larissa Roberta. **Projeto de arranjos de antenas microstrip patch.** 2019 Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho.
- [36] WENTWORTH, Stuart M. . **Eletromagnetismo Aplicado:** Abordagem Antecipada das Linhas de Transmissão. Bookman, 2009. 671 p.
- [37] SILVA NETO, Almir Souza e . **Antenas de microfita para 4G, 5G e arranjo de antenas cilíndricas.** 2016 Tese - Universidade Federal do Rio Grande do Norte.
- [38] ROCHA, Jéssica Pederneiras Moraes et al. **Caracterização e confecção de uma antena de microfita para recepção de TV digital e aplicação em notebooks através do Ansoft HFSS.** Revista Principia, v. 21, 2012.
- [39] FREITAS, Eudes Fernandes de. . **Análise paramétrica de antenas de linha dobrada de microfita** 2019 Dissertação - Universidade Federal Rural do Semi-árido.
- [40] BALANIS, Constantine A.. **Teoria Das Antenas:** Análise E Síntese. Volume 2 (3a. Ed.), f. 168. 335 p.
- [41] SIMÕES, Joanderson Fernandes; GERMANO, Matheus Victor de Paiva; NASCIMENTO, Paula Régia Silva do . **Análise e síntese de antenas patch de microfita.** 2017 Trabalho de Conclusão de Curso - Instituto Federal de Educação , Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte.
- [42] HIÇDURMAZ,Bahadir;FARUK GUMUS,Omer. **Design and analysis of 28 GHz Microstrip Patch Antenna for Different Type FR4 Claddings.** In: UNIVERSTIY JOURNAL OF THE FACULTY OF ENGINEERING,n vol 24. 2019. 2 ed.
- [43] POZAR, David M.. **Microwave Engineering.** 4 ed. John Wiley & Sons, v. 1, f. 376, 2011. 752 p.
- [44] ANDRADE, Betoven Oliveira de. **Estudo de arranjos e antenas de microfita com patch quase-fractal para comunicações sem fio** Dissertação - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2014.
- [45] GUERRA, Juan Rafael Filgueira. **Projeto de antena de microfita flexível utilizando de tecido malha a base de fibras naturais e sintéticas.** Dissertação - Universidade Federal Rural do Semi-árido, 2016.
- [46] MILLIGAN, Thomas A.. **Modern Antenna Design.** 2 ed. John Wiley & Sons, f. 290, 2005. 580 p.

- [47] OLIVEIRA, Maciel Alves de et al. **Técnicas de Casamento de Impedâncias por Linha de Microfita em Antenas Patch Circular para Tecnologia ISM em 2,4 GHz.** 2016. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/308013744>. Acesso em: 1 jun. 2022.
- [48] A.I.SAYEDD, Mamatin. **A Design Rule for Inset-fed Rectangular Microstrip Patch Antenna.** 2010. Disp em: <https://www.researchgate.net/publication/228897496>. Acesso em: 3 jun. 2022.
- [49] HOLANDA, Samanta Mesquista de . **Estudo e desenvolvimento de antenas de microfita utilizado tecido de malha a base de fibra têxteis compostas.** 2016 Dissertação - Universidade Federal Rural do Semi-árido.
- [50] ARG, Ramesh et al. **Microstrip Antenna Design Handbook.** Artech House, v. 1, f. 423, 2001. 845 p.
- [51] **RT/duroid® 5880LZ Laminates** - Rogers Corporation. Disponível em: <https://rogerscorp.com/advanced-electronics-solutions/rt-duroid-laminates/rt-duroid-5880lz-laminates>>. Acesso em: 20 jun. 2022.
- [52] PEDRA, Antônio Carlos de Oliveira. **Otimização de antena de microfita banda larga de formato "E" utilizando o método de FDTD.** 2010 Dissertação - Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- [53] CASU, Geroge; MORARU, Catalin; KOBACS, Andrei. **Desing and Implementation of Microstrip Patch Antenna Array.** 2014. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6866738>. Acesso em: 15 jun. 2022.
- [54] ELTZ, Renan Petry. **Desenvolvimento de um modelo de antena patch reconfigurável nas faixas 3G, 4G e Wi-Fi** Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2019.
- [55] BULLA, Giovani. **Otimização de Largura de banda de antena de microfita** Dissertação - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2011.
- [56] BALANIS, Constantine A.. **Teoria Das Antenas: Análise E Síntese.** Volume 1 (3a. Ed.),, f. 168. 2009. 335 p.
- [57] MJV TEAM. **5G no Brasil: tudo o que você precisa saber para sair na frente.** 2022. Disponível em: <https://www.mjvinnovation.com/pt-br/blog/5g-no-brasil/>. Acesso em: 20 jul. 2022
- [58] SABATH, F.; MOKOLE, E.L.; SAMADDAR, S.N. Definition and Classification of Ultra-Wideband Signals and Devices. **The Radio Science Bulletin**, v. 313, June 2005.

- [59] HERINGER, Lisiane C. *et al.* Sistemas de Comunicação de Banda Ultralarga .
In: REVISTA CIENTÍFICA PERIÓDICA - TELECOMUNICAÇÕES, n. 01. VOL 9.
- [60] NEKOOGAR, Faranak. **Ultra-wideband Communications: Fundamentals and Applications**. Prentice Hall, f. 107, 2005. 213 p.