



ESTUDO DE ANTENA MIMO APLICADA À 5ª GERAÇÃO DE REDES MÓVEIS

Resumo - Na transmissão de sinais existem interferências e atenuações precisam ser minimizadas. Para isso, sugere-se 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 é o arranjo de antenas retangulares de microfita, baixo custo e fácil construção. Nesse contexto, esse artigo apresenta um estudo de antenas retangulares de microfita MIMO. Os resultados obtidos foram comprovam que a técnica de múltiplas antenas de entrada e múltiplas antenas de saída, 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.

Palavras-Chave – quinta geração (5G), antenas de microfita retangular, capacidade, MIMO

STUDY OF MIMO ANTENNA APPLIED TO THE 5TH GENERATION OF MOBILE NETWORKS

Abstract - In signal transmission there are interferences and attenuations need to be minimized. For this, we suggest the use of multiple inputs and multiple outputs (MIMO), which help to improve gain, bandwidth and, consequently, channel capacity. An example is the arrangement of rectangular microstrip antennas, which are low cost and easy to build. In this context, this article presents a study of rectangular MIMO microstrip antennas. The results obtained prove that the technique of multiple input antennas and multiple output antennas help to improve channel capacity, gain, bandwidth, directivity and other factors. In this way, justifying its use in the implementation of 5G technology.

Keywords - fifth generation (5G), rectangular microstrip antennas, capacity, MIMO

I. INTRODUÇÃO

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 [1,2].

Segundo o vice-presidente de produtos 5G da Huawei, Cullen Xu, a melhoria da qualidade da rede proporciona o desenvolvimento contínuo de desempenho da rede 5G. 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 [1,3].

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. Esses valores em termos de população global representam 66% em 2018 e 71% em 2023 [1,4]. 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.

Este artigo apresenta um estudo comparativo de um arranjo de antena de microfita no sistema MIMO operando na faixa de frequência de 26 GHz. Essa é uma das faixas de frequências padronizadas para operar no Brasil de acordo com a Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL). A base 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.

Para isso, na seção II são apresentados os conceitos de capacidade de canal e antenas MIMO. Na seção III, é descrita a modelagem das antenas. Os resultados obtidos são mostrados e discutidos na seção IV. Por fim, as conclusões são apresentadas na seção V.

II. SISTEMA MIMO

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 [1,5].

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. De acordo com um dos teoremas de Shannon, conhecido como teorema da capacidade de informação, tem-se a Equação 1 [1,5].

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

Onde B representa (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 (*Additive White Gaussian Noise*) conforme a Equação 1 [1,5].

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, o sinal de mensagem pode ser transmitido por meio de um sistema sem erros, ainda que o canal seja ruidoso [1,5].

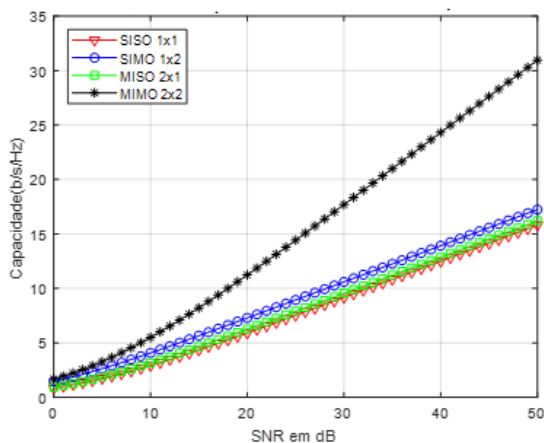
A. Capacidade de Sistemas de Múltiplas Antenas

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 [1,6]. Dessa maneira, é analisado as diferentes respostas desses sistemas quanto à capacidade do canal e taxa de erros.

Após as análises de capacidade de canal e taxa de erro de bit individuais de cada sistema: SISO (*Single Input Single Output*), MISO (*Multiple Input Single Output*), SIMO (*Single Input Multiple Output*) e MIMO (*Multiple Input Multiple Output*), pode-se observar qual dentre esses sistemas apresentou melhor resposta.

Nas Figuras 1 e 2 verificam-se as respostas das variações dos sistemas considerando a SNR máxima de 50 dB e E_b/N_0 mínimo de -10 dB. Para a simulação da taxa de erro foi utilizado a modulação BPSK.

Figura 1: Capacidade de canal dos sistemas.



Fonte: A autora.

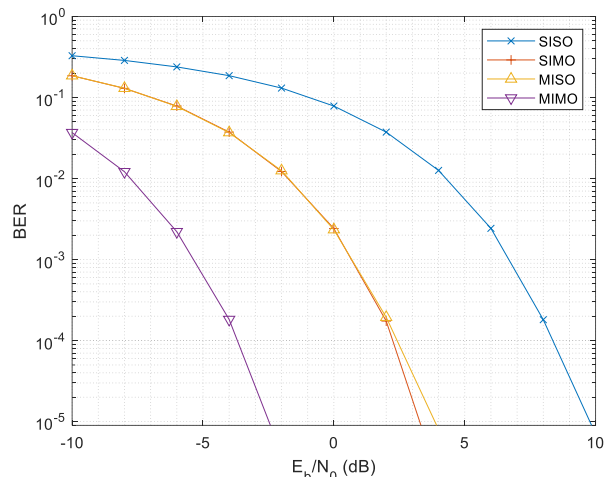
Tabela 1: Capacidade de canal (SISO, MISO, SIMO, MIMO).

Capacidade do Canal	Capacidade do Canal (b / s / Hz)	SNR (dB)
SISO	$C_{SISO} = B \log_2(1 + SNR)$	15,79
MISO	$C_{MISO} = M_T B \log_2(1 + SNR)$	16,17
SIMO	$C_{SIMO} = M_R B \log_2(1 + SNR)$	17,22
MIMO	$C_{MIMO} = N M B \log_2(1 + SNR)$	30,96

Fonte: A autora.

Utilizando os dados da Tabela 1, obteve-se o gráfico da Figura 1 verificou-se que o sistema MIMO, para a mesma SNR = 50 dB, apresentou a maior capacidade de utilização do canal.

Figura 2 – Taxa de erro de bit dos sistemas.



Fonte: A autora.

Observando o gráfico da Figura 2 e os resultados numéricos apresentados na Tabela 2 verificou-se que o sistema MIMO, para a mesma relação -10 dB, apresentou a menor taxa de erro de bit.

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

	Taxa de erro de bits BER	E_b/N_0 (dB)
SISO	0,3275	-10
MISO	0,1855	-10
SIMO	0,1855	-10
MIMO	0,03684	-10

Fonte: A autora.

Dessa forma, conclui-se que o sistema MIMO apresentou melhor resultado 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.

B. Antenas MIMO

Recentemente, o conceito de antenas MIMO, tem sido aplicado às comunicações móveis, 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 [1,7].

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 [1,7].

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 [1,8].

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.

C. Antenas de microfita

Os motivos de grande popularidade das antenas de microfita (striplines) a partir da década de 70 foram facilidade de fabricação com uso de tecnologia de circuito impresso; ter boa compatibilidade com circuitos integrados; ter baixo custo de produção; e leveza.

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.

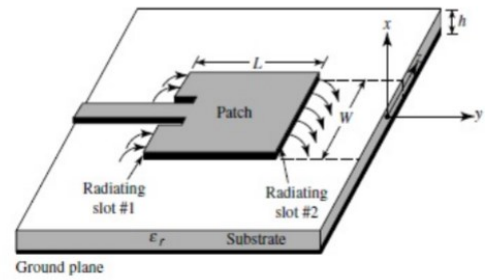
Esse tipo de antena apresenta versatilidade em termos de frequência de ressonância, polarização, diagrama de irradiação e impedância, dependendo do elemento e o modo irradiante que é escolhido para o projeto. A geométrica do

condutor irradiante (*patch*) da antena, pode ser de diferentes formas: quadrada, retangular, circular, elíptico, entre outros.

As formas mais usuais são a retangular e circular, devido a maior facilidade de análise de comportamento e construção, conforme mostra a Figura 3 [1,9].

Esse tipo de antena constitui, basicamente, de um condutor irradiante - *patch*, um substrato dielétrico e um plano terra. 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 $0.003\lambda_0 \leq h \leq 0.05\lambda_0$) [1,10,11].

Figura 3: Configuração genérica de uma antena de microfita.



Fonte: [12].

Utilizou-se o *patch* retangular devido sua maior utilização e maior facilidade de implementação.

III. MODELAGEM DAS ANTENAS

No desenvolvimento da antena proposta, definiu-se os seguintes parâmetros: frequência de operação (f_c), constante dielétrica relativa do substrato (ϵ_r) e altura do substrato (h). Esses e outros parâmetros são mostrados na Tabela 3.

Tabela 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 μ m
Espessura do substrato	h	0,1 mm
Frequência de operação	f	26 GHz

Fonte: A autora.

Definido os parâmetros iniciais, na próxima etapa calcula-se as dimensões da antena: a largura (W), comprimento da antena (L), comprimento da linha de microfita (l_f).

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

$$\Delta L = 0.412h \frac{(\epsilon_{ef} + 0.3) \left(\frac{W}{h} + 0.264\right)}{(\epsilon_{ef} - 0.258) \left(\frac{W}{h} + 0.8\right)} \quad (3)$$

$$L_{ef} = \frac{1}{2f_c \sqrt{\epsilon_{ef}}} \quad (4)$$

$$L = L_{ef} - 2\Delta L \quad (5)$$

$$l_f = \frac{c}{4f_c\sqrt{\epsilon_{ef}}} \quad (6)$$

Onde,

- c – velocidade da luz no vácuo;
- ϵ_{ef} – constante dielétrica relativa do substrato;
- h – altura do substrato;
- f_c – frequência de operação;
- ϵ_r – constante dielétrica relativa do substrato;
- h – altura do substrato;
- ΔL – comprimento incremental de extensão.

Para efetuar o casamento de impedância foi escolhida a técnica de *inset-fed*. tem-se as seguintes equações para o comprimento do inset (In_L) e a largura do inset (In_W).

$$In_L = \frac{L}{\pi} \text{acos}[2R_{in}(G_1 \pm G_{12})] \quad (7)$$

$$In_W = \frac{c}{\sqrt{2\epsilon_{ef}}} \frac{4,65 \times 10^{-12}}{f} \quad (8)$$

Onde,

- R_{in} – resistência de entrada;
- G_1 – condutância da primeira fenda irradiante;
- G_{12} – condutância mútua entre as fendas de irradiação.

Para inserir mais de uma antena no sistema, foi calculado o espaçamento de centro a centro das antenas, que conforme a literatura o indicado é que seja pelo menos $\lambda/2$. Porém, no projeto foi considerado para o cálculo o λ guiado conforme a equação seguinte, que considera o material do dielétrico [1,13,14].

$$\lambda_g = \frac{\lambda}{\sqrt{\epsilon_{ef}}} \quad (9)$$

Onde,

- λ – comprimento de onda no vácuo;
- λ_g – comprimento de onda guiado.

Os cálculos das equações supracitadas foram realizados no software Matlab, e em seguida, as antenas foram desenvolvidas na ferramenta de simulação computacional CST *Studio Suite* versão para estudante 2021. A Tabela 4 a seguir mostra os valores obtidos após os cálculos.

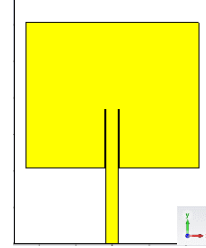
Tabela 4: Parâmetros de alimentação e inset-fed.

Parâmetro	Símbolo	Valor
Largura antena	W	4,7106 mm
Comprimento antena	L	3,9711 mm
Largura inset	In_W	0,027194 mm
Comprimento inset	In_L	1,3851 mm
Largura linha de transmissão	w_f	0,32715 mm
Comprimento da linha de transmissão	l_f	2,0676 mm
Resistência de entrada	R_{in}	50 Ω

Fonte: A autora.

A Figura 4 ilustra a Proposta I, antena de referência, que consiste de uma única antena de microfita.

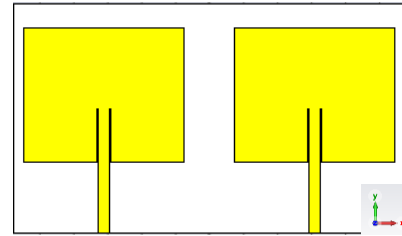
Figura 4 – Antena de microfita da proposta I.



Fonte: A autora.

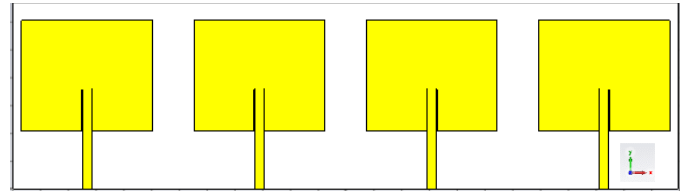
A Figura 5 ilustra a antena da proposta II que é constituído de duas antenas de microfita compondo o sistema MIMO. E a Figura 6 ilustra a antena da proposta II que é constituído de quatro antenas de microfita compondo o sistema MIMO.

Figura 5 – Antena de microfita da proposta II.



Fonte: A autora.

Figura 6 – Antena de microfita da proposta III.



Fonte: A autora.

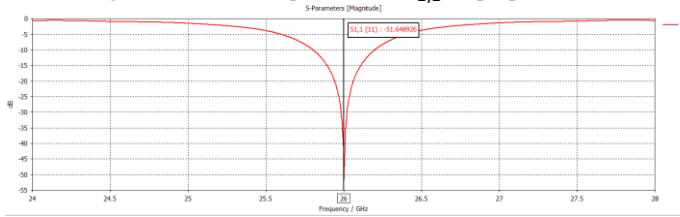
IV. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os resultados, numéricos e gráficos, foram coletados ferramenta de simulação computacional CST *Studio Suite* versão para estudante 2021.

i. Resultados da Proposta I

Para a Proposta I, de uma única antena, observa-se que na frequência de projeto, 26 GHz, o parâmetro $S_{1,1}$ apresenta valor de $-51,648$ dB, conforme o gráfico na Figura 7.

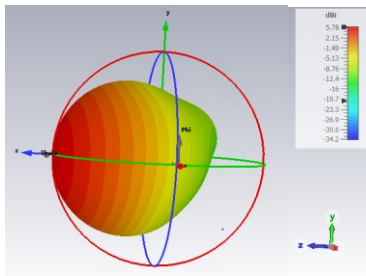
Figura 7: Gráfico do parâmetro $S_{1,1}$ da proposta I.



Fonte: A autora.

O diagrama de radiação 3D é ilustrado na Figura 8. E na Tabela 5 são mostrados os resultados numéricos dos principais parâmetros ganho, diretividade, eficiência de radiação e eficiência total.

Figura 8: Digrama de radiação da proposta I.



Fonte: A autora.

Tabela 5: Resultados obtidos do diagrama de radiação Proposta I.

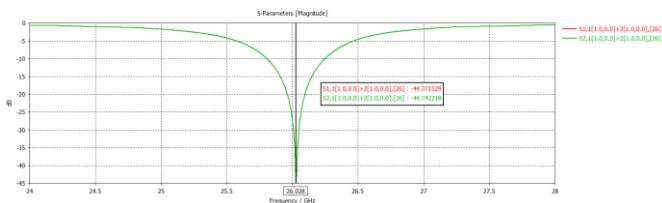
Parâmetro	Valor
Ganho	5,784 dBi
Diretividade	7,341 dBi
Eficiência de radiação	-1,558 dB
Eficiência total	-1,569 dB

Fonte: A autora.

ii. Resultados da Proposta II

Para a Proposta II, um sistema MIMO de duas antenas, observa-se 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 conforme o gráfico na Figura 9.

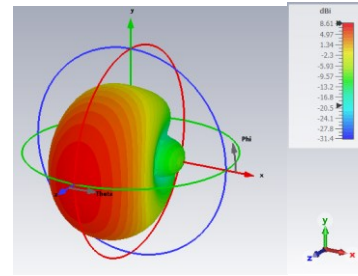
Figura 9: Gráfico dos parâmetros $S_{1,1}$ e $S_{2,1}$ da proposta II.



Fonte: A autora.

O diagrama de radiação 3D é ilustrado na Figura 10. E na Tabela 6 são mostrados os resultados numéricos dos principais parâmetros ganho, diretividade, eficiência de radiação e eficiência total.

Figura 10: Digrama de radiação da proposta II.



Fonte: A autora.

Tabela 6: Resultados obtidos do diagrama de radiação Proposta II.

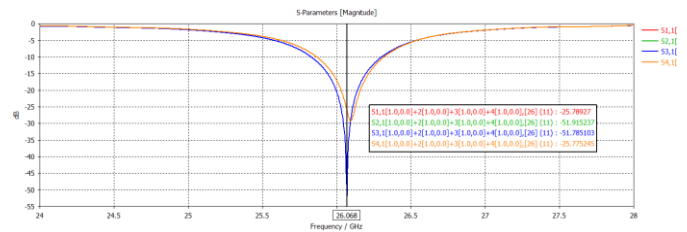
Parâmetro	Valor
Ganho	8,611 dBi
Diretividade	9,929 dBi
Eficiência de radiação	-1,318 dB
Eficiência total	-1,363 dB

Fonte: A autora.

iii. Resultados da Proposta III

Na Proposta III, um sistema MIMO de quatro antenas, 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 dB, -51,94 dB, -51,78 dB e -25,77 dB, respectivamente conforme o gráfico na Figura 11.

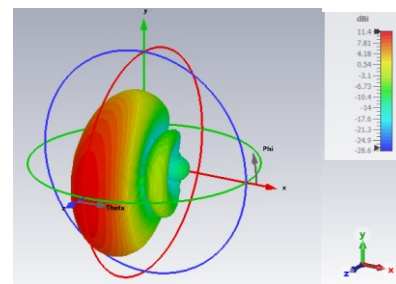
Figura 11: Gráfico dos parâmetros $S_{1,1}$, $S_{2,1}$, $S_{3,1}$ e $S_{4,1}$ da proposta III.



Fonte: A autora.

A Figura 12 ilustra o diagrama de radiação 3D e, os respectivos resultados numéricos dos parâmetros ganho, diretividade, eficiência de radiação e eficiência total são apresentados na Tabela 7.

Figura 12: Digrama de radiação da proposta I.



Fonte: A autora.

Tabela 7: Resultados obtidos do diagrama de radiação Proposta III.

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

Fonte: A autora.

A. Comparativo das Antenas no Sistema MIMO

Os resultados apresentados na Tabela 8 são utilizados para uma avaliação comparativa de desempenho das três propostas apresentadas.

Tabela 8: Resultados obtidos das Propostas I, II e III.

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

Fonte: A autora.

De acordo com os valores obtidos mostrados na Tabela 7, observou-se que todas as propostas atingiram a faixa de frequência projetada. Em relação aos parâmetros ganho e diretividade, observou-se uma diferença de aproximadamente 3dB entre as propostas avaliadas e a Proposta III apresentou resultados melhores.

Na análise comparativa dos valores obtidos de eficiência, a Proposta I apresentou o melhor resultado. Avaliando o 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.

V. 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.

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 [1,3].

Observando os resultados obtidos nas simulações conclui-se que o aumento da quantidade de antenas no sistema ocasionou resultados melhores nos quesitos avaliados. Essa afirmativa baseia-se, por exemplo nos valores de diretividade encontrados para primeira antena (7,341 dBi) e para o último sistema proposto (12,72 dBi). Assim como, em relação ao

ganho, observou-se 5,784 dBi da Proposta I (uma antena) e 11,45 dBi da Proposta III (quatro antenas). 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, 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.

REFERÊNCIAS

- [1] REIS BORGES, Priscila. Arranjo de antenas MIMO aplicado à 5ª geração de redes móveis. 2022 Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Eletrônica e de Telecomunicações) - Universidade Federal de Uberlândia. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/36163>
- [2] 5 tendências tecnológicas pré e pós pandemia., [s.d.]. Disponível em: <https://deolhonofuturo.uninter.com/tendencias-tecnologicas-pandemia/>. Acesso em: 10 jul. 2022S.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] HAYKIN, Simon. Sistemas de comunicação: Analógicos e digitais. 4 ed. Bookman, 2004. 837 p.
- [6] LESSA, Carmen Lúcia Avelar. Esquema para transmissão utilizando MIMO com cooperação de usuários. 2011 Dissertação - Universidade Estadual de Campinas.
- [7] PEERI, Eduardo B.. Smart Antennas: Antenas Inteligentes Aplicadas à Telefonia Celular. Teleco - Inteligência em Telecomunicações. 2009. Disponível em: <https://docplayer.com.br/56784442-Smart-antennas-antennas-inteligentes-aplicadas-a-telefonia-celular.html>. Acesso em: 18 jul. 2022.
- [8] BUENO, Henrique de Oliveira. ANÁLISE DE DESEMPENHO DE UMA TRANSMISSÃO DOWNLINK EM REDE 5G SEGUINDO MODELO DE CANAL 3GPP RELEASE 15. 2019 Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Federal de Uberlândia.
- [9] FREITAS, Eudes Fernandes de. ANÁLISE PARAMÉTRICA DE ANTENAS DE LINHA DOBRADA DE MICROFITA (MICROSTRIP MEANDER LINE ANTENNAS - MMLA) . 2019 Dissertação - Universidade Federal Rural do Semi-árido.

- [10]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.
- [11]HIÇDURMAZ,Bahadır;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.
- [12]BALANIS, Constantine A.. Teoria Das Antenas: Análise E Síntese. Volume 2 (3a. Ed.), f. 168. 335 p.
- [13]WENTWORTH, Stuart M. . Eletromagnetismo Aplicado: Abordagem Antecipada das Linhas de Transmissão. Bookman, 2009. 671 p.
- [14]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.