



**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
ELÉTRICA
MESTRADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

IGGOR BEZERRA DA SILVA

**Estudo de antenas monopolo impresso de formato F
para aplicação em *wireless* 5G com MIMO massivo**

Mossoró/RN
2019

IGGOR BEZERRA DA SILVA

Estudo de antenas de monopolo impresso de formato F para aplicação em *wireless* 5G com MIMO massivo

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Linha de Pesquisa: Telecomunicações e Eletromagnetismo Aplicado.

Orientador(a): Prof. Dr. Idalmir de Souza Queiroz Júnior - UFERSA

Co-orientador(a): Prof. Dr. André Pedro Fernandes Neto - UFERSA

Mossoró/RN
2019

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação do Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

B586e Bezerra da Silva, Iggor.
Estudo de antenas monopolo impresso de formato F para aplicação em wireless 5G com MIMO massivo / Iggor Bezerra da Silva. - 2019.
78 f. : il.

Orientador: Idalmir de Souza Queiroz Júnior.
Coorientador: André Pedro Fernandes Neto.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal Rural do Semi-árido, Programa de Pós-graduação em , 2019.

1. Rede móvel. 2. tecnologia 5G. 3. antena monopolo. 4. MIMO massivo. I. de Souza Queiroz Júnior, Idalmir, orient. II. Fernandes Neto, André Pedro, co-orient. III. Título.

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

IGGOR BEZERRA DA SILVA

**Antenas de Microfita para aplicação em *wireless* 5G
com MIMO Massivo**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Linha de Pesquisa: Telecomunicações e Eletromagnetismo Aplicado.

Orientador: Prof. Dr. Idalmir de Souza Queiroz Júnior

Co-orientador: Prof. Dr. André Pedro Fernandes Neto - UFERSA

Aprovada em: 18/12/2019

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Idalmir de Souza Queiroz Júnior (Orientador - UFERSA)



Prof. Dr. Humberto Dionísio de Andrade (Membro interno – UFERSA)



Prof. Dr. Marinaldo Pinheiro de Sousa Neto (Membro externo – IFRN/Mossoró)

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer em especial ao meu orientador Idalmir de Souza Queiroz Júnior que sempre se fez presente para dar apoio.

Agradeço a Deus, aos meus familiares e amigos por me proporcionarem esse presente.

Agradeço também aos meus professores do mestrado e graduação que que ajudaram e apoiaram.

“Julgar e condenar moralmente é a
vingança preferida das almas limitadas”

(Friedrich Nietzsche)

RESUMO

A tecnologia de telefonia está sempre em processo de evolução com decorrer do tempo. Esse avanço da rede móvel objetiva uma melhor e mais rápida conexão, para acompanhar esse avanço é necessário que os equipamentos que fornecem essa transmissão de dados também acompanhem essa evolução. Com a chegada da tecnologia 5G haverá melhoria na qualidade, velocidade e confiabilidade do sinal, sendo assim, faz-se necessário uma antena capaz de enviar e transmitir a qualidade de dados requerido pela nova tecnologia. O sistema MIMO Massivo oferece uma transmissão de dados mais confiável, com menores perdas e maior velocidade de transmissão. Portanto o sistema MIMO Massivo representa um ótimo aliado para trabalhar em conjunto com a tecnologia 5G. Esse trabalho tem por objetivo a simulação e construção de um sistema MIMO Massivo para aplicação na tecnologia 5G na faixa de frequência de 3,5 GHz, faixa de operação na América Latina. Para isso foi feito a análise de uma antena monopolo impressa para a determinação do elemento de antena que compõe o sistema MIMO, após a análise foi feita a sua simulação e construção. Determinado o elemento de antena do sistema MIMO foram feitas simulações com vários tipos de sistemas MIMO e por fim a simulação e construção da antena MIMO Massivo 64x64 e seus devidos testes em relação ao Coeficiente de Correlação de Envelope (CCE). Os resultados apresentaram que o sistema MIMO Massivo ofereceu uma aceitável isolamento entre seus elementos de antena e um coeficiente de reflexão operando dentro da faixa de operação da tecnologia 5G no Brasil.

Palavras-Chave: Rede móvel, tecnologia 5G, antena monopolo, MIMO massivo.

ABSTRACT

Telephony technology is always in constant evolution. This advancement of the mobile network focus for a better and faster connection, to go with this advancement it is necessary that the equipment that provides this data transmission also accompany this evolution. With the arrival of 5G technology will improve the quality, speed and reliability of the signal, so it is necessary an antenna tha can send and transmit the data quality required by the new technology. The massive MIMO system offers more reliable data transmission with lower losses and faster transmission speeds. Therefore the massive MIMO system represents a great ally to work in conjunction with 5G technology. This work goals to simulate and build a massive MIMO system for application in 5G technology in the 3.5 GHz frequency range, operating range in Latin America. For this, it was made the analysis of a printed monopole antenna to determine the antenna element that makes up the MIMO system, after the analysis was made its simulation and construction. Determining the antenna element of the MIMO system, simulations were made with many types of MIMO systems and finally the simulation and construction of the 64x64 Massive MIMO antenna and its tests regarding the Envelope Correlation Coefficient (ECC). The results showed that the MIMO massive system offered acceptable isolation between its antenna elements and a reflection coefficient operating within the operating range of 5G technology in Brazil.

Keywords: Mobile network, 5G technology, monopole antenna, massive MIMO.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Taxa de dados média em função do SNR para diferentes sistemas MIMO.	17
Figura 2 - Sistema MIMO 2x2.....	18
Figura 3 - Antena de microfita	27
Figura 4 - Formas típicas de elementos de <i>patch</i> de microfita.....	28
Figura 5 –Alimentação por linha de microfita.	29
Figura 6 - Alimentação por sonda coaxial..	29
Figura 7 - Circuito elétrico equivalente da sonda coaxial.	30
Figura 8 - Alimentação via acoplamento por abertura.....	30
Figura 9 - Circuito elétrico equivalente do acoplamento por abertura.	31
Figura 10 - Alimentação via acoplamento por proximidade.....	31
Figura 11 - Circuito elétrico equivalente do acoplamento por proximidade.	32
Figura 12 - Linha de microfita.....	32
Figura 13 - Linhas de campo elétrico.	32
Figura 14 - Vista superior da plaqueta.	34
Figura 15 - Linha de alimentação com inset fed.....	36
Figura 18 - Protótipo de sistema MIMO de banda tripla.	38
Figura 19 - Antena <i>slot</i> quadrada com duas linhas de alimentação.....	40
Figura 20 - Antena dipolo de polarização dupla.	42
Figura 21 - Desing modular <i>sub array</i> de 16 antenas dipolo de polarização dupla.	42
Figura 22 - Elementos de antena MIMO.	43
Figura 23 – <i>Patch</i> da antena de monopolo sem toco.	46
Figura 24 - <i>Patch</i> antena de monopolo.	47
Figura 25 - Plano de terra antena de monopolo.....	47
Figura 26 - a) <i>Patch</i> MIMO 2x2, b) Plano de terra MIMO 2x2.	49
Figura 27 - a) <i>Patch</i> MIMO 4x4, b) Plano de terra MIMO 4x4.	50
Figura 28 - a) <i>Patch</i> MIMO 8x8, b) Plano de terra MIMO 8x8.	50
Figura 29 - a) <i>Patch</i> da antena monopolo, b) Plano de terra da antena monopolo.....	52
Figura 30 - Antena monopolo com conector <i>Pigtail</i>	52
Figura 31 - a) <i>Patch</i> da antena MIMO 2x2, b) Plano de terra da antena MIMO 2x2.	53
Figura 32 - a) <i>Patch</i> da antena MIMO 64x64, b) Plano de terra da antena MIMO 64x64.	53
Figura 33 - a) Detalhe do <i>Patch</i> MIMO 64x64, b) Detalhe do Plano de terra MIMO 64x64.....	54
Figura 34 - VNA Rohde & Schwarz ZND.....	54
Figura 35 - Medição da antena de monopolo com VNA Rohde & Schwarz® ZND.....	55

Figura 36 - Medição do sistema MIMO 2x2 com VNA Rohde & Schwarz® ZND.	55
Figura 37 - Medição do sistema MIMO Massivo 64x64 com VNA Rohde & Schwarz® ZND.	56
Figura 38 - Antenas Medidas do MIMO massivo 64x64.	57
Figura 39 - Coeficiente de reflexão das antenas com toco (<i>F-shaped</i>) e sem toco.	58
Figura 40 - Diagramas de radiação da antena monopolo em forma de F. a) 2D, b) 3D	59
Figura 41 – Coeficiente de Reflexão (S_{11}) medido e simulado do sistema MIMO 2x2.	60
Figura 42 - Coeficiente de Reflexão (S_{22}) medido e simulado do sistema MIMO 2x2.	60
Figura 43 - Diagramas de radiação do sistema MIMO 2x2. a) 2D, b) 3D.	62
Figura 44 - Coeficiente de correlação de envelope do sistema MIMO 2x2.	63
Figura 45 - Parâmetros S medidos dos elementos (5,5) e (8,8) do sistema MIMO massivo 64x64.	64
Figura 46 - Coeficiente de correlação de envelope dos elementos (5,5) e (8,8) do sistema MIMO Massivo 64x64.	65
Figura 47 - Parâmetros S medidos dos elementos (5,5) e (6,6) do sistema MIMO massivo 64x64.	66
Figura 48 - Coeficiente de correlação de envelope dos elementos (5,5) e (6,6) do sistema MIMO Massivo 64x64.	67
Figura 49 - Parâmetros S medidos dos elementos (6,6) e (8,8) do sistema MIMO massivo 64x64.	68
Figura 50 - Coeficiente de correlação de envelope dos elementos (6,6) e (8,8) do sistema MIMO Massivo 64x64.	69

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros da antena.....	48
Tabela 2 - Comparação de faixa de operação antenas com toco (<i>F-shaped</i>) e sem toco.....	59
Tabela 3 - Comparativo de coeficiente de reflexão (S_{11}) medido e simulado do sistema MIMO 2x2.	61
Tabela 4 - Comparativo de coeficiente de reflexão (S_{22}) medido e simulado do sistema MIMO 2x2.	61
Tabela 5 - Coeficientes de reflexão S_{11} e S_{22} dos elementos (5,5) e (8,8) do sistema MIMO massivo 64x64 medido.....	64
Tabela 6 - Coeficientes de reflexão S_{11} e S_{22} dos elementos (5,5) e (6,6) do sistema MIMO massivo 64x64 medido.....	66
Tabela 7 - Coeficientes de reflexão S_{11} e S_{22} dos elementos (6,6) e (8,8) do sistema MIMO massivo 64x64 medido.....	68

NOMENCLATURA

Letras Latinas

I_{nR} – Matriz identidade das antenas receptoras

H – Função de transferência de multi-antena

n_T – Número de antenas transmissoras

n_R – Número de antenas receptoras

t – Espessura do elemento metálico radiante

h – Espessura do substrato

W – Largura do *patch*

L_0 – Comprimento do *patch*

f_r – Frequência de ressonância

c – Velocidade de propagação de ondas eletromagnéticas

W_m – Largura da linha de transmissão

L_m – Comprimento da linha de transmissão

R – Resistência

L – Indutância

C – Capacitância

y_0 – Comprimento do *inset fed*

Z_0 – Impedância característica da linha de transmissão

Z_{in} – Impedância de entrada da antena

Z_c – Impedância do transformador de $\frac{1}{4}$ de onda

Q – Fator de qualidade

k – número de onda

A_x – potencial vetorial

\vec{E} – Campo elétrico

\vec{H} – Campo magnético

m , n e p – Número de meio-ciclos presentes nas direções x , y e z , respectivamente

dB – Decibel

S – Matriz de espalhamento

S_{11} – Coeficiente de reflexão da tensão no acesso 1 do quadripolo

S_{22} – Coeficiente de reflexão da tensão no acesso 2 do quadripolo

S_{21} – Ganho de tensão direta do quadripolo

S_{12} – Isolação do quadripolo

Letras gregas

ρ – Relação sinal-ruído

ρ_{e21} – Coeficiente de Correlação de Envelope

\dagger – Transposição conjugada

λ_0 – Comprimento de onda no espaço livre

λ_g – Comprimento de onda guiado

ε_r – Permissividade elétrica

ε_{ref} – Permissividade elétrica efetiva

ε – Permissividade elétrica complexa

ε' – Constante dielétrica

ε'' – Fator de Perdas

μ – permeabilidade magnética

δ_{ef} – Tangente de perdas efetiva

$\tan \delta$ – Tangente de perdas

Siglas

MIMO – Multiple-Input Multiple-Output

IEEE – *Institute of Electrical and Electronic Engineers*

5G – *Fifth generation*

RCA – *Radio Corporation America*

CCE – *Coeficiente de Correlação de Envelope*

FC – *Fator de Compactação*

TM – *Transverse Magnetic*

SNR – *Signal-to-noise ratio*

3GPP – *3rd Generation Partnership Project*

IETF – *Internet Engineering Task Force*

ITU-R – *ITU Radio communication Sector*

ITU-T – *ITU Telecommunication Standardization Sector*

LAN – *Area Network*

MAN – *Metropolitan Area Network*

PAN – *Personal Area Network*

RAN – *Regional Area Network*

WG – *Working Group*

RFC – *Request For Comments*

IPv4 – *Internet Protocol version 4*

IPv6 – *Internet Protocol version 6*

DNS – *Domain Name System*

TCP – *Transmission Control Protocol*

HTTP – *Hypertext Transfer Protocol*

BGP – *Border Gateway Protocol*

URLLC – *Ultra-Reliable Low-Latency Communication*

HIP – *Host Identity Protocol*

SIP – *Session Initiation Protocol*

MTC – *Machine-Type Communication*

OAM – *Operations Administration and Maintenance*

IoT – *Internet of Things*

CPS – *Cyber-Physical System*

eMBB – *Enhanced Mobile Broadband*

mMTC – *massive Machine Type Communications*

RF – *Rádio Frequência*

LTE – *Long Term Evolution*

OFDM – *Orthogonal Frequency Division Multiplexing*

VNA – *Vector Network Analyser*

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
1.1. OBJETIVO GERAL.....	15
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	15
2. REVISÃO DA LITERATURA	16
2.1. SISTEMA MIMO.....	16
2.1.1. História do MIMO.....	18
2.1.2. Coeficiente de Correlação de Envelope.....	21
2.2. TECNOLOGIA 5G.....	21
2.3. ANTENAS DE MICROFITA.....	26
2.3.1. Métodos de alimentação de antenas de microfita.....	28
2.3.2. Métodos de análise.....	32
2.3.3. Modelo de linha de transmissão.....	32
2.4. ANTENA MONOPOLO.....	36
2.5. ESTUDOS ACERCA DE MIMO E MIMO MASSIVO.....	37
3. MATERIAIS E MÉTODOS	45
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	58
5. CONCLUSÃO	70
5.1. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	71
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	72

1. INTRODUÇÃO

As comunicações móveis vêm revolucionando o mundo desde algumas décadas e seu crescimento vem se dando de maneira exponencial devido a procura e necessidade da tecnologia no dia a dia do usuário. A utilização de redes móveis traz benefícios como comodidade, facilidade, flexibilidade e praticidade que garantem uma maior conexão e interatividade para o seu usuário, benefícios esses que foram de primordial importância para sua ascensão de forma repentina nos últimos anos.

Essas comunicações móveis dependem dos elementos e dispositivos constituintes do sistema, como o protocolo de comunicação, elementos de transmissão e recepção de dados, *softwares* para a decodificação e tratamento dos dados. Portanto para que haja uma comunicação móvel rápida e de qualidade necessita-se que todos esses elementos e dispositivos que compõem o sistema sejam capazes de fornecer essa comunicação.

Com o surgimento de estudo a essa tecnologia, mais desafios são propostos para a melhoria da comunicação e com isso o aumento dos requisitos de qualidade e velocidade do sistema, procurando satisfazer os usuários que se tornam cada vez mais exigentes com o serviço.

A tecnologia 5G é um exemplo desses serviços ao usuário que visam maior velocidade, confiabilidade e qualidade da transmissão e recepção de dados. Essa tecnologia vem sendo estudada a alguns anos para melhor adequação ao mercado e é proposta sua implantação em meados de 2020.

Em conjunto a tecnologia 5G é proposto por esse trabalho a implantação de um sistema Múltiplas Entradas – Múltiplas saídas, também conhecido como MIMO, para a transmissão e recebimento de dados dessa nova tecnologia, que exige um sistema de comunicação de maior velocidade e confiabilidade de dados.

1.1. OBJETIVO GERAL

Desenvolver um sistema MIMO Massivo com antenas monopolo impressa para aplicação em *wireless* 5G com frequência de operação de 3,5GHz.

1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos serão listados para melhor divisão e compreensão do tópico.

- Realizar um estudo acerca das antenas MIMO;
- Realizar estudo sobre protocolos, padrões e atividades de operação da tecnologia 5G;
- Projetar e simular vários sistemas MIMO com diferentes quantidades de elementos de antena;
- Construir um sistema MIMO Massivo e antenas necessárias para validação do sistema;
- Analisar os resultados e comportamento das antenas construídas para averiguar o desempenho do sistema.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1. SISTEMA MIMO

O sistema MIMO (*Multiple-Inputs Multiple-Outputs*) utiliza múltiplas antena para aumentar a capacidade do canal sem perder o espectro adicional ou potência na transmissão. Para alcançar o máximo de capacidade do canal o arranjo precisa possuir um relevante padrão de ganho e amplo lóbulo. O MIMO ainda deve fornecer uma alta eficiência de radiação, baixa correlação de enlace e alto isolamento entre as portas de sinal (FOUDAZI, 2012).

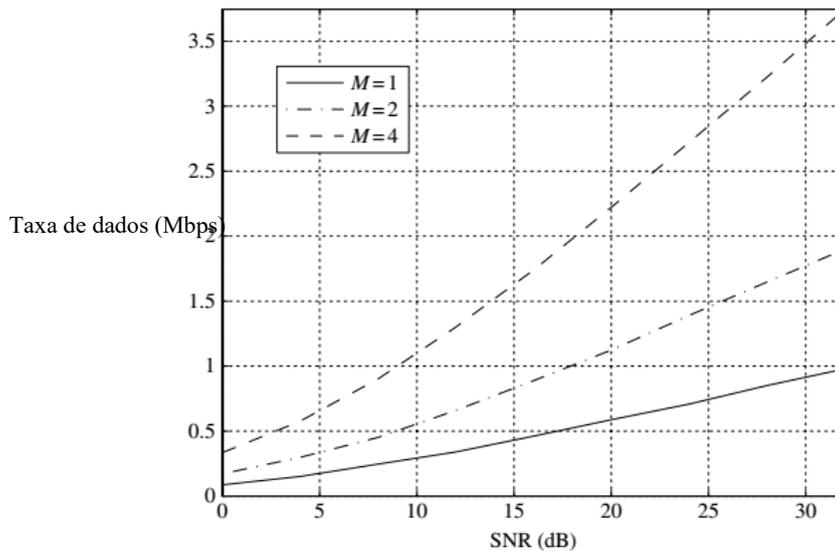
A tecnologia MIMO é conhecida pelo uso de múltiplas antenas no transmissor e múltiplas antenas no receptor em um sistema sem fio e que ganhou sua popularidade por apresentar uma satisfatória capacidade de melhoria de desempenho em relação ao sistema com uma entrada e uma saída. O MIMO consegue reaproveitar os sinais que são refletidos durante seu percurso, o que aumenta a taxa de transferência, minimizando a perda de sinal no meio.

A comunicação em canais sem fio é prejudicada predominantemente pelo enfraquecimento de sinal por múltiplos caminhos. O multi-percurso é a recepção do sinal transmitido ao receptor pretendido através de diferentes frequências e/ou diferentes ângulos e/ou diferentes atrasos de tempo deslocados devido a dispersão de ondas eletromagnéticas no ambiente. Portanto a potência do sinal recebido se varia no espaço, devido à dispersão do ângulo, e/ou frequência, devido a dispersão do atraso, e/ou tempo, devido ao efeito Doppler, através da superposição aleatória dos componentes do múltiplo caminho em conflito. Essa variação aleatória da intensidade do sinal pode comprometer a qualidade e confiabilidade da comunicação sem fio (BIGLIERI et al., 2007).

Os sistemas sem fios convencionais que apresentam uma única antena, única entrada e única saída, apresentam limitações das dimensões de tempo e frequência, a vantagem da tecnologia MIMO é que ela oferece uma exploração da dimensão espacial fornecida pelas múltiplas antenas na transmissão e recepção (BIGLIERI et al., 2007).

É indicado na Figura 1 a performance de uma estrutura MIMO, um gráfico que relaciona a taxa de dados pela relação de sinal-ruído (*Signal-to-noise ratio* – SNR) de recepção em um canal de 100kHz para um sistema $M \times M$ onde M assume valor de 1, 2 e 4, Portanto um MIMO 1x1, 2x2 e 4x4, respectivamente.

Figura 1 - Taxa de dados média em função do SNR para diferentes sistemas MIMO.

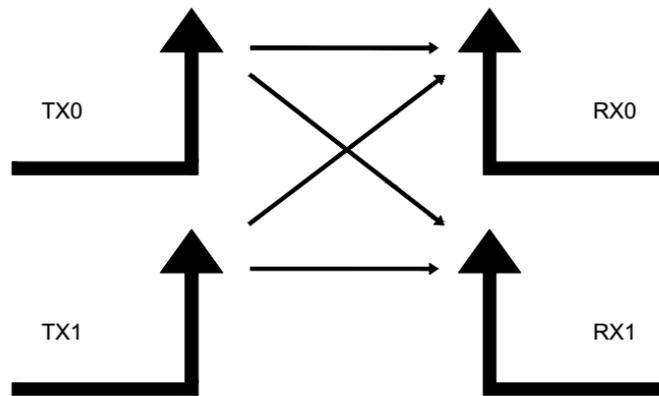


Fonte: Adaptado de Biglieri *et al.* (2007).

A partir da Figura 1 pode-se perceber que ao passo que se aumenta a quantidade de elementos de antena M a taxa de transferência de dados aumenta para o mesmo valor de SNR.

A Figura 2 apresenta um sistema MIMO 2x2, onde possui duas antenas transmissoras e duas receptoras, portanto o tempo de envio de dados será duas vezes mais rápido que um sistema convencional com apenas uma antena de recepção e uma para transmissão.

Figura 2 - Sistema MIMO 2x2



Fonte: Autoria própria.

2.1.1. História do MIMO

É notável o avanço e disseminação da tecnologia MIMO (*Multiple-Inputs Multiple-Outputs*) nos últimos 10 anos, porém essa tecnologia não é tão recente quanto aparenta, ela já vem sendo estudada desde meados de 1920 e apenas agora se viu uma grande necessidade de sua utilização (JENSEN, 2016).

Como a comunicação MIMO envolve várias antenas, então será tratado primeiro da diversidade de antenas. A diversidade de antenas tem origem nos estudos e experimentos dos engenheiros da RCA (*Radio Corporation America*) Harold H. Beverage e Harold O. Peterson, onde eles notaram que sinais de transmissão de rádio em duas estações localizadas a cerca de um quilômetro de distância tinham intensidades de sinal muito diferentes. Para superar essa atenuação do sinal, eles pensaram no resultado da propagação de múltiplos caminhos, então eles desenvolveram um sistema de diversidade em cada saída de áudio de dois diferentes receptores onde se combinam para melhorar a qualidade do áudio e fizeram observações experimentais indicando que as duas antenas precisariam estar separadas a uma distância de pelo menos um comprimento de onda para que operassem de maneira satisfatória (H. H. BEVERAGE, 1931).

Segundo Bartlett (1941, apud JENSEN, 2016) a grande dificuldade com a combinação de diversidade de sinal foi que cada antena precisaria de um

receptor caro e dedicado somente a ela. Em 1941, foi proposta uma técnica que utilizava um único receptor de rádio com um seletor que alternava as frequências entre as duas antenas de 300 e 1000 Hz, apresentando uma resposta de sinal médio ao receptor que ofereceu uma certa imunidade a atenuação do sinal.

Com um bom entendimento sobre processamento de sinais e a sofisticação dos circuitos de rádios disponíveis na década de cinquenta foi possível o desenvolvimento de técnicas de aperfeiçoamento para combinação de diversidade de antenas receptoras, algoritmos esses que formaram a base de sistemas de comunicação de diversidade para as quatro décadas seguintes (BRENNAN, 1959).

Em 1996 Foschini escreveu o primeiro artigo em que mostrava a capacidade de comunicação permitida por um sistema de N_T antenas transmissoras e N_R antenas receptoras, partindo do pressuposto de que a rádio transmissão não sabe nada sobre a função de transferência de multi-antena H do transmissor para o receptor, onde a capacidade é dada por,

$$C = \log_2 \det [I_{n_R} + (\rho/n_T) \cdot HH^\dagger] \text{ bps/Hz} \quad (1)$$

onde I_{n_R} é a matriz identidade das antenas receptoras, ρ é a relação sinal-ruído de uma única antena e \dagger a transposição conjugada. Foschini afirmou que a capacidade aumenta de forma drástica com a adição de antenas, sugerindo assim o uso de um número de antenas o quanto o espaço permitir. De acordo com ele o espaçamento de antenas menores do que meio comprimento de onda pode proporcionar uma melhoria significativa da capacidade (FOSCHINI, 1996).

O trabalho de Foschini foi posteriormente complementado em 1998 por ele mesmo utilizando o mesmo tópico do trabalho, teve contribuições também, no mesmo ano, de Raileigh e Cioffi que demonstraram que é possível conseguir uma capacidade de comunicação maior para o caso de o transmissor conhecer o canal. Eles apresentaram uma estrutura de codificação de espaço-tempo para a melhoria da captura de algumas capacidades de comunicação disponíveis com múltiplos caminhos em um canal multi-antena (RAILEIGH e CIOFFI, 1998).

Alamouti (1998) concluiu a base de estudos sobre diversidade de sinal e capacidade de comunicação quando apresentou em seu artigo um esquema simples de diversidade de transmissão de duas ramificações. Esse esquema mostra que ambos os sistemas, o primeiro com duas antenas transmissoras e uma receptora e o segundo com uma antena transmissora e duas receptoras, possuem a mesma ordem de diversidade da combinação de receptor de máximo raio. O esquema de diversidade de transmissão forneceu a pré-codificação de transmissão ideal para explorar as propriedades do canal com múltiplos caminhos quando o transmissor não conhece a função de transferência do canal no domínio da frequência H .

Uma maneira de melhorar o ganho de capacidade é realizando uma situação que use antena multi-modo onde os padrões para diferentes modos apresentem alta ortogonalidade do sinal, ou seja, baixo fator de correlação. As descobertas de Raleigh e Cioffi forneceram entendimento de que a combinação de propagação por múltiplos caminhos com rádios multi-antenas é capaz de transmitir uma forma de onda única de cada antena, podendo ser usado para comunicar informações de forma independente (JENSEN e WALLACE, 2004).

Spencer, Jeffs, Jensen e Swindlehurst (2000) apresentaram um resultado importante associado a pesquisa de propagação por múltiplos caminhos enfatizando a melhora nos modos de comunicação. A pesquisa apresentou que em ambientes *indoor*, avaliando as características da natureza de espaço-tempo total do canal, os componentes multipercursos tendem a ser agrupados em ângulos, onde o agrupamento de ângulos médio é distribuído de forma uniforme para todos os ângulos.

A comunicação MIMO cresceu bastante, no conceito acadêmico, nas últimas décadas, ela se tornou um dos principais componentes dos modernos sistemas de comunicação. A tecnologia WLAN, originalmente oferecendo uma taxa de dados de pico de 2 Mbps quando foi lançada pela primeira vez em 1997, apenas um ano após o primeiro artigo sobre MIMO escrito por Foschini, foi melhorada ampliando com capacidade MIMO e ofereceu taxas máximas de dados de 300 Mbps. A tecnologia MIMO é incluída de forma consistente em padrões de tecnologia sem fio móvel sofisticado. Assim conta-se que a tecnologia MIMO massiva com sinalização MIMO multiusuário associada permita

ganhos de desempenho ainda maiores em futuros sistemas sem fio (JENSEN, 2016).

2.1.2. Coeficiente de Correlação de Envelope

Um dos principais parâmetros na avaliação do desempenho de um sistema de antenas MIMO é o *Envelope Correlation Coefficient* (ECC), ou Coeficiente de Correlação de Envelope (CCE). Esse parâmetro foi proposto por Blanch, Romeu e Corbella (2003) e apresenta a vantagem de não se fazer necessário a análise dos diagramas de radiação das antenas para se ter conhecimento sobre a interferência no sistema. Esse coeficiente proporciona um fácil entendimento dos efeitos causados pelo acoplamento mútuo e performance de diversidade de um sistema de antenas, e é calculado a partir dos valores reais e imaginários dos parâmetros S. O valor do Coeficiente de correlação de envelope entre duas antenas é obtido através da Equação 1 (BLANCH; ROMEU; CORBELLA, 2003).

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

A correlação de envelope proporciona um processo de design mais simplificado de múltiplas antenas pois oferece uma solução simples para calcular a forma de disposição das antenas no sistema. Esse coeficiente indica o quão essas antenas possuem padrões de radiação independentes, quanto mais próximo de zero mais independente. Em escala esse coeficiente é considerado aceitável valores inferiores a 0,5 e interferência desprezível para valores inferiores a 0,3 (ZHANG et al., 2013).

2.2. TECNOLOGIA 5G

A tecnologia 5G apresenta três técnicas chave para comunicação da perspectiva de capacidade de sinal: MIMO massivo para melhoria do sistema do espectro de eficiência, ondas milimétricas que é empregado para expandir a largura de banda do sistema e redes ultra-densas e multi-camadas utilizadas para aumentar a reutilização espectral geográfica. O sistema de comunicação MIMO massivo utiliza uma matriz massiva de antenas para servir múltiplos usuários. Esse sistema é capaz de combater o desvanecimento de sinal das ondas milimétricas, melhorando o retorno do *wireless*, e suprime as interferências das redes densas multi-camadas. (ZHAO et al., 2018).

A base de estudos e padrões da tecnologia 5G é formada por órgãos de normas que trabalham do escopo da forma de uso da tal. Esses órgãos não se restringem somente ao *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE), contemplam o *3rd Generation Partnership Project* (3GPP), o *Internet Engineering Task Force* (IETF), *ITU Radio communication Sector* (ITU-R) e *ITU Telecommunication Standardization Sector* (ITU-T). O propósito desse grupo é identificar padrões relacionados a tecnologia 5G, descrever os aspectos de padronização tratados por cada aplicação e usar casos que serão habilitados por esses padrões (NIKOLICH et al., 2017).

O comitê de padrões IEEE 802 *Local Area Network* (LAN) e *Metropolitan Area Network* (MAN), conhecido somente como IEEE 802 é composto por aproximadamente 1000 participantes que desenvolvem padrões 802 para redes, principalmente nas camadas 1 e 2 do modelo de referência *Open Systems Interconnection*. Esses padrões abordam redes em uma variedade de escalas, como LAN, MAN, *Personal Area Network* (PAN) e *Regional Area Network* (RAN) (IEEE 802, 2016).

As redes atuais e futuras de pacotes de dados são sustentadas pelo IEEE 802 na qual mantém e desenvolve a maioria dos padrões da tecnologia. A consolidação da 5G irá redefinir uma gama de setores: entretenimento e experiências imersivos, transporte autônomo e mais seguro, acesso confiável a assistência médica remota, agricultura mais inteligente, segurança pública melhorada, manufatura mais autônoma, uso mais eficiente de energia, cidades e infraestrutura sustentável e logística digitalizada (NIKOLICH et al., 2017).

Grande parte dos padrões e projetos dentro do IEEE 802 têm uma participação no suporte ao desenvolvimento, habilitação e serviço da classe 5G. Durante o “5G/IMT-2020 Standing Committee” (*International Mobile Telecommunications*) foi identificado um subconjunto específico que foi constituído de fevereiro a julho de 2016 (IEEE 802, 2016).

O relatório final do comitê define uma lista de padrões e projetos de “possível relevância” para 5G de acordo com o respectivo *Working Group* (WG).

A *Internet Engineering Task Force* (IETF) desenvolve principalmente o núcleo da Camada 3 e protocolos superiores para *Internet* e *Intranet*. Ela existe como uma *Standards Development Organization* (SDO) desde o início de 1986, porém os primeiros *Request For Comments* (RFC) datam do final da década de 60. Dentre os padrões produzidos pela IETF se destacam o *Internet Protocol version 4* e *6* (IPv4 e IPv6), *Domain Name System* (DNS), *Transmission Control Protocol* (TCP) e *Hypertext Transfer Protocol* (HTTP) (HOFFMAN, 2019).

O trabalho da IETF não se restringe somente a redes fixas ou sem fio, é tudo sobre *Internet*. Porém, para a rede sem fio o 3GPP adotou vários protocolos IETF em sua arquitetura de sistema celular. O IETF e o 3GPP têm uma relação de ligação próxima para rastrear tópicos técnicos. A quinta geração da arquitetura do sistema 3GPP, ou seja, o “5G” a partir do Rel-14, voltará a se aproximar de um sistema All-IP (3GPP, 2011).

Pela IETF a 5G não iniciou nenhum novo item de trabalho importante que pudesse ser rotulado como 5G especificamente. Mas existem vários itens de trabalhos em andamento que têm relevância para a próxima arquitetura do sistema 5G. Para dar suporte às pesquisas tem ocorrido “*side meetings*” ou “*Bar Birds of a Feather* (BoFs)” que funcionam como reuniões paralelas para identificar e iniciar um novo protocolo de trabalho nas reuniões da IETF. É esperado que a 5G como uma arquitetura de sistema celular na verdade não venha a requerer um trabalho de protocolo IETF específico para o seu domínio, e sim que as soluções se alinhem em grande parte aos desenvolvimentos genéricos das tecnologias da *Internet*. O progresso desses estudos se devem a ampla adoção de tecnologias de data center, virtualização de funções de rede, separação de planos de controle e dados em todo o sistema e movimentação de todos os aplicativos de multimídia para tecnologias comuns baseadas na *web*

para a arquitetura de sistema celular, que já fazem parte das implantações anteriores a 5G (NIKOLICH et al., 2017).

O IETF apresenta uma lista que destaca alguns grupos de trabalho e áreas que são bastante relevantes quando se trata de tópicos proeminentes de 5G:

- **Área de roteamento:** Responsável por desenvolver protocolos de roteamento, por exemplo, *Border Gateway Protocol* (BGP) e OSPV, que são tecnologias chave para redes de transporte como MPLS e MPLS-TP. Existem três áreas de interesse potencial para 5G, que são: *Deterministic Networking* (DetNet WG) para rede sensível ao tempo e bastante confiável na camada 3; *Service Function Chaining*, como o SFC WG; e as tecnologias de rede privada virtual, como o BESS WG. Esses protocolos e tecnologias tem potencial suficiente para formar a base para as redes de transporte terrestre da Rede de Acesso por Rádio 5G, podem formar também novas plataformas de serviços de rede, assim como o conceito de fatiamento da rede. As tecnologias de realidade aumentada, automação industrial e carros autônomos utilizam as redes determinísticas e fatiamento, onde essas tecnologias são aplicações existentes do *Ultra-Reliable Low-Latency Communication* (URLLC).
- **Área da Internet:** Se caracteriza como o ambiente do IP e mobilidade de IP. O IPv6 possui uma relevante importância devido ao seu espaço de endereço “ilimitado” e adequação para acesso múltiplo / *multi-homing*, permitindo um número quase que infinitos de dispositivos conectados para usuários finais. A 5G assim como redes celulares vêm apresentando um interesse em mobilidade de IP. Os usuários finais estão acostumados com conexões que não sejam interrompidas dentro da tecnologia de acesso, sem interrupção na conectividade ou na usabilidade do aplicativo. A IETF vem trabalhando com arquiteturas de mobilidade distribuídas, não centralizadas, com controles separados e planos de usuário, como o *Distributed Mobility Management Work Group* (DMM WG),

que compartilha semelhanças com a arquitetura do sistema 3GPP 5G. Um outro domínio potencial de trabalho dentro da mobilidade são as soluções baseadas em divisão de localização / identificador criadas pelo *Host Identity Protocol* (HIP).

- **Aplicações e a área em tempo real:** Esse ramo tem sido uma das áreas mais ativas da IETF se tratando de arquitetura de sistema celular definida pelo 3GPP, principalmente devido a importância do *Session Initiation Protocol* (SIP), distribuição de conteúdo, voz baseada na web e aplicativos multimídia / comunicação. É provável que isso sendo impulsionado pelo trabalho da *Internet of Things* (IoT) e pela *Machine-Type Communication* (MTC) que foram identificados como um dos principais serviços 5G.
- **Área de transporte:** É uma área de bastante interesse, visto que existe diferença no uso de redes com ou sem fio quanto ao comportamento do protocolo de transporte. Existem as várias soluções de acesso, como o *Multipath Transmission Control Protocol Work Group*, enfileiramento e novos protocolos de transporte que desafiam a predominância do *Transmission Control Protocol* que deve estar no radar para 5G, como o exemplo do QUIC WC. Para que o usuário disponha de uma melhor experiência ao acessar serviços baseados em *Web* é feito um maior impulsionamento no trabalho do novo protocolo de transporte. Uma área que também se destaca está relacionada ao monitoramento ativo de desempenho em banda e *Overview of Operations, Administration, and Maintenance* (OAM) quando há necessidade de entender o comportamento exato de um determinado caminho de dados e encontrar gargalos em uma rede de transporte ou em um serviço complexo composto de um *data center*.
- **Área de segurança:** As soluções de segurança para o domínio de aplicativo IoT são de extrema importância em um tópico específico relacionado aos serviços 5G previstos. Abordar as preocupações com a privacidade, do ponto de vista dos usuários finais, é uma das principais áreas críticas para todo o trabalho de segurança da IETF.

O padrão ITU 5G/IMT-2020 fornece velocidades superiores a 20Gb/s. Essa nova tecnologia apresenta melhorias na qualidade do sinal em relação as tecnologias antecessoras. Esse novo padrão pretende promover uma latência de sinal de 1ms, a LTE tem latências até 50 vezes superior à nova tecnologia. A ITU 5G/IMT-2020 terá conexões de 1.000.000 de usuários por km², o limite da tecnologia LTE é de 10.000 por km², isso representa um aumento de 100 vezes do número de usuários por km². A taxa de transferência por conexão poderá chegar a 10Gbps. Nesse novo padrão serão implementadas novas tecnologias como MIMO Massivo, ondas milimétricas e uma multiplexação com base no OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) que não é utilizada na tecnologia 4G (CARUGI, 2018).

2.2.1. Requerimentos da Tecnologia 5G

A comunicação 5G apresenta vários tipos de aplicação, que incluem, serviços *eHealth*, pilotagem automotiva, Internet tátil, *Cyber-Physical System* (CPS), dentre outras. As aplicações podem ser classificadas em três grupos: *Enhanced Mobile Broadband* (eMBB), *Massive Machine Type Communications* (mMTC) e *Ultra Reliable and Low Latency Communications* (URLLC). São definidos alguns objetivos de performance para a comunicação 5G que são, aumentar a taxa de transferência em 1000 vezes, aumentar a eficiência de energia em 10 vezes, encurtar o *end-to-end delay* para 1/5-1/10 e prolongar a vida das baterias de equipamentos de baixa potência em 10 vezes (ZHAO et al., 2018).

2.3. ANTENAS DE MICROFITA

Para atender os requisitos de aplicação em comunicação sem fio e rádio móvel em aeronaves, satélites, mísseis e aplicações aeronáuticas, onde o tamanho, custo, peso, desempenho e instalação são fatores determinantes, se opta pela utilização de antenas de microfita. Essas antenas são facilmente moldadas a vários tipos de perfis, sejam eles planos ou não. Possui a vantagem

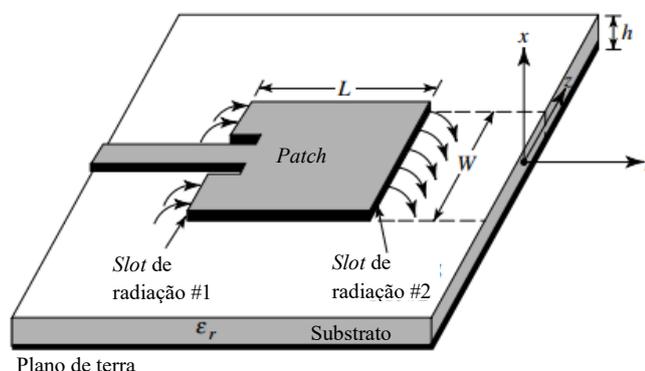
de serem mecanicamente robustas e consegue abranger todos os tipos de polarização, frequência de ressonância, diagrama e impedância, adaptando a forma da antena com o modo de utilização (BALANIS, 2005).

Apesar das antenas de microfita apresentarem boas características físicas e operacionais, o seu uso tem limitações quanto ao seu desempenho. Uma das principais desvantagens desse tipo de antena é a largura de banda estreita, mas pode-se fazer uso de artifícios para melhorar a largura de banda como aumentar a espessura do substrato, alterar a forma do *patch* da antena, ou fazer um agrupamento de elementos. Apresenta também uma baixa potência, baixa eficiência e, portanto, um alto fator de qualidade Q (BALANIS, 2005).

Os primeiros estudos e publicações sobre antenas de microfita são datados da década de 1950 realizados nos Estados Unidos por Deschamps (DESCHAMPS, 1953). O estudo sobre antenas de microfita, ou antenas de *patch*, ganhou mais destaque a partir da década de 1970 com pesquisas realizadas, também nos Estados Unidos por Byron. (BYRON, 1970).

Uma antena de microfita consiste em um elemento metálico que radia, conhecido também como *patch*, que apresenta uma espessura que é muito menor que o comprimento de onda no espaço livre ($t \ll \lambda_0$), impresso sobre um material dielétrico, onde t é o tempo e o λ_0 é o comprimento de onda. Na outra face se localiza o plano de terra, que fica sob o dielétrico. A Figura 3 apresenta uma antena de microfita.

Figura 3 - Antena de microfita

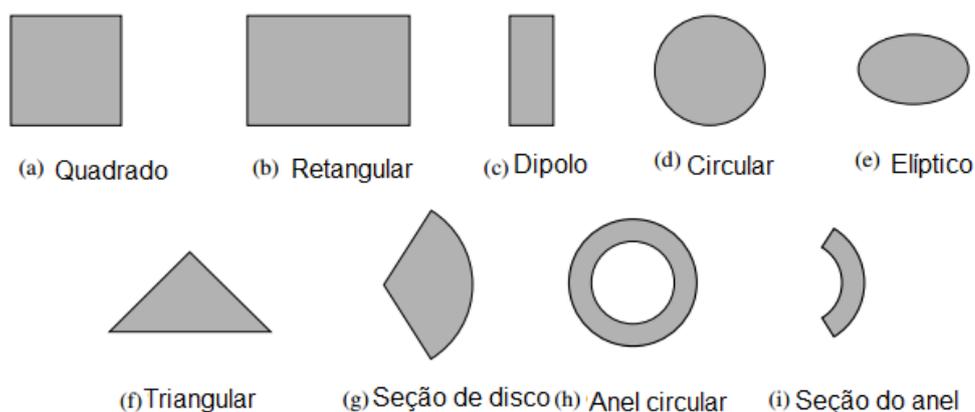


Fonte: Adaptado de BALANIS (2005).

No projeto da antena de microfita pode ser usado diferentes materiais para o substrato. Para se projetar antenas com maior eficiência, maior largura de banda e campos mais desprendidos são utilizados substratos mais espessos e com baixo valor de constante dielétrica.

O elemento radiante (*patch*) e a linha de alimentação são gravados no substrato dielétrico e podem possuir diversas formas. As formas mais convencionais do *patch* da antena são quadradas, fita estreita retangular (dipolo), circular, elíptica e triangular. Podendo também possuir qualquer forma, de acordo com o critério de aplicação do projetista. Pode ser obtida qualquer tipo de polarização com apenas um único elemento ou conjunto de elementos. Algumas das formas de *patch* são ilustradas na Figura 4.

Figura 4 - Formas típicas de elementos de *patch* de microfita.



Fonte: Adaptado de BALANIS (2005).

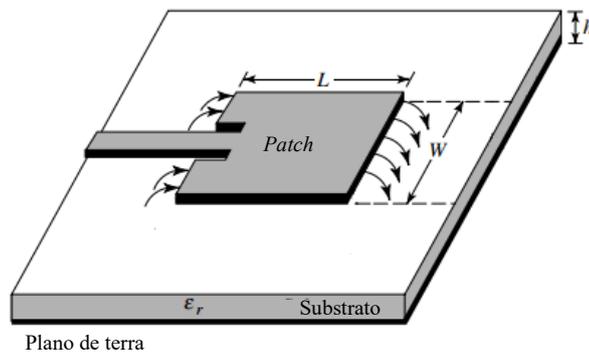
2.3.1. Métodos de alimentação de antenas de microfita

Dentre as diversas configurações de alimentação de antenas de microfita as quatro mais populares são a linha de microfita, sonda coaxial, acoplamento por abertura e acoplamento por proximidade.

A alimentação de linha de microfita consiste em uma fita condutora que tem a largura menor do que a do *patch*. Tem por característica fácil fabricação e simples casamento de impedância, quando controlado o ponto de inserção, e simples modelagem. As ondas de superfície e radiação espúria gerada pela

alimentação aumentam à medida que a espessura do substrato também aumenta, limitando assim a largura de banda, que geralmente varia de 2 a 5%. A alimentação de linha de microfita é representado pela Figura 5.

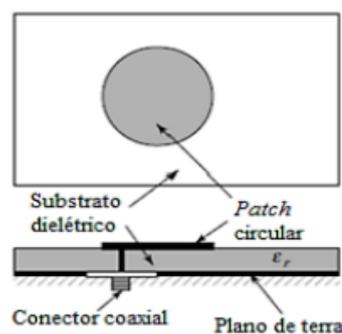
Figura 5 –Alimentação por linha de microfita.



Fonte: Adaptado de BALANIS (2005).

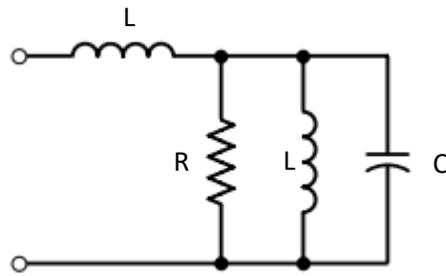
A alimentação por cabo coaxial ou sonda coaxial é feita quando se conecta o elemento ativo do conector, condutor interno do coaxial, no *patch* da antena, e o condutor externo do coaxial ao plano de terra. Tem por característica difícil modelagem, principalmente para substratos espessos onde $h > 0,02\lambda_0$, fácil construção, fácil casamento de impedância e apresenta uma baixa radiação espúria. A Figura 6 ilustra a alimentação por sonda coaxial em uma antena de microfita. A representação do circuito elétrico equivalente da sonda coaxial é representada na Figura 7. (BALANIS, 2005).

Figura 6 - Alimentação por sonda coaxial..



Fonte: Adaptado de BALANIS (2005).

Figura 7 - Circuito elétrico equivalente da sonda coaxial.

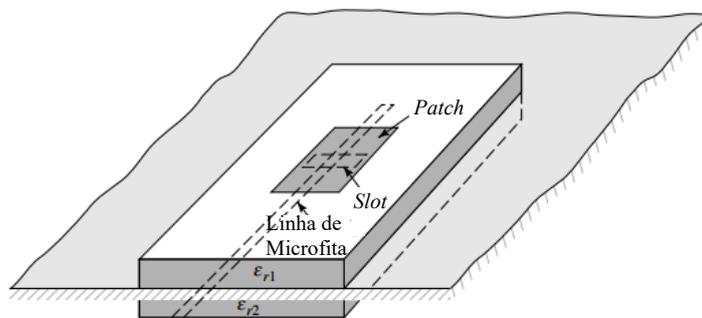


Fonte: Adaptado de BALANIS (2005).

As alimentações por linha de microfita e sonda coaxial geram modos de ordens superiores por possuírem assimetrias inerentes, a geração desses modos produzem uma radiação de polarização cruzada. A polarização cruzada indica uma radiação na direção oposta a que foi convencionalizada. Para descartar esses problemas na alimentação se utiliza a alimentação sem contato via acoplamento por abertura (BALANIS, 2005).

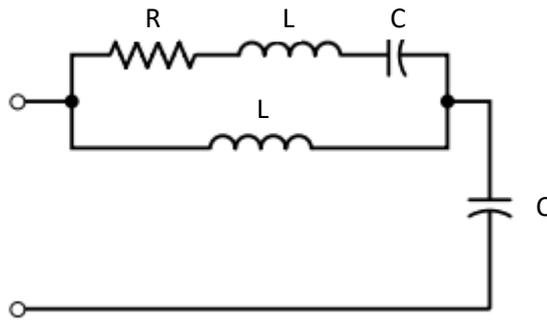
O acoplamento por abertura consiste em dois substratos separados por um plano de terra, na face inferior do substrato de baixo há uma linha de microfita. O acoplamento da energia à plaqueta é feito através de uma fenda no plano de terra que separa os dois substratos. Tem por característica difícil fabricação, possui banda estreita, modelagem razoavelmente simples e radiação espúria moderada. Esse tipo de alimentação é mostrado na Figura 8 e seu circuito elétrico equivalente na Figura 9 (BALANIS, 2005).

Figura 8 - Alimentação via acoplamento por abertura.



Fonte: Adaptado de BALANIS (2005).

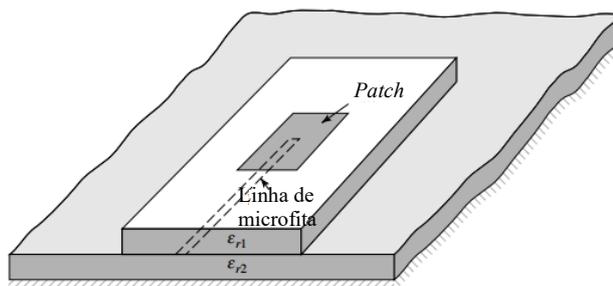
Figura 9 - Circuito elétrico equivalente do acoplamento por abertura.



Fonte: Adaptado de BALANIS (2005).

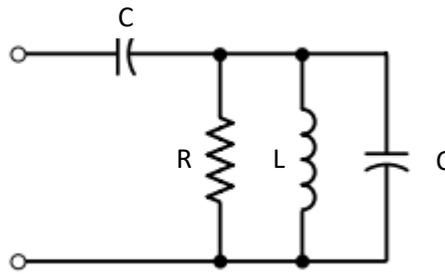
O método de alimentação via acoplamento por proximidade consiste em uma linha de microfita sobre um substrato inferior, o acoplamento é feito pelas ondas eletromagnéticas emitidas pela linha de microfita que passam pelo substrato superior até chegar ao *patch*. Tem por característica relevante largura de banda, a maior dentre as formas de alimentações citadas, modelagem relativamente simples, baixa radiação espúria e difícil construção. Esse método e seu circuito elétrico equivalente são mostrados nas Figuras 10 e 11 respectivamente (BALANIS, 2005).

Figura 10 - Alimentação via acoplamento por proximidade.



Fonte: Adaptado de BALANIS (2005).

Figura 11 - Circuito elétrico equivalente do acoplamento por proximidade.



Fonte: Adaptado de BALANIS (2005).

2.3.2. Métodos de análise

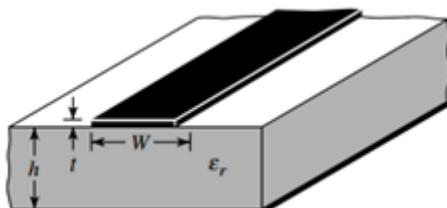
Os métodos de análise que serão abordados somente os que se baseiam na distribuição de corrente magnética equivalente ao redor das bordas do *patch* da antena. Esses métodos são o modelo de linha de transmissão e modelo de cavidade.

2.3.3. Modelo de linha de transmissão

Esse modelo tem por finalidade representar uma antena de microfita por duas fendas que são separadas por uma linha de transmissão de baixa impedância (Z_c) e comprimento (L) do *patch*.

A Figura 12 apresenta as dimensões físicas da alimentação por linha de microfita. O franjamento dos campos nas bordas da plaqueta é causado por conta de as dimensões da plaqueta serem finitas, tanto em comprimento, como em largura, como pode ser visto na Figura 13.

Figura 12 - Linha de microfita.



Fonte: Adaptado de BALANIS (2005).

Figura 13 - Linhas de campo elétrico.



Fonte: Adaptado de BALANIS (2005).

Para o plano E principal, plano x - y , o franjamento é função da razão entre o comprimento L do *patch* e a espessura h . O franjamento é reduzido nas antenas de microfita pois elas apresentam um $L/h \gg 1$. Apesar de esse efeito não ser tão acentuado ele deve ser levado em conta pois afeta diretamente na frequência de ressonância da antena. Pela Figura 14 pode-se ver que a maior parte das linhas de campo elétrico reside no substrato e outra parte no ar. Consegue-se notar também que a maior quantidade de linhas reside no substrato pois $\epsilon_r \gg 1$ e $W/h \gg 1$ (BALANIS, 2005).

Como esse efeito percorre dois meios com constantes dielétricas diferentes é introduzida uma nova constante para englobar e representar a resultante da duas, que é a constante dielétrica efetiva ϵ_{ref} . A definição da constante dielétrica efetiva é: Um material dielétrico uniforme tal que a linha de transmissão tenha características elétricas idênticas, particularmente a constante de propagação, às da linha verdadeira. A constante dielétrica efetiva é expressa pela Equação 2.

$$\epsilon_{ref} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \cdot \left[1 + 12 \frac{h}{W} \right]^{-1/2} \quad (2)$$

Onde o ϵ_r é o valor da constante de permissividade relativa do substrato da antena, h é a espessura do substrato e W é a largura do *patch*.

Devido ao efeito de bordas as dimensões físicas da antena ficam maiores, onde esse valor se estende além da antena e é dado por ΔL , no qual é dado em função da constante dielétrica efetiva e da razão entre a largura da antena e espessura do substrato como mostra a Equação 3.

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

Onde o comprimento efetivo da antena é dado por duas vezes a variação do comprimento mais o comprimento físico da antena, como pode ser visto pela Equação 4.

$$L_{ef} = L + 2\Delta L \quad (4)$$

A Figura 14 mostra as dimensões da plaqueta ao longo de seu comprimento e que são estendidas em cada extremidade pela variação de comprimento ΔL .

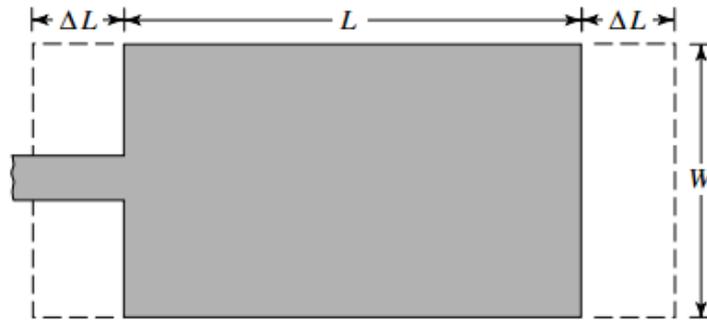


Figura 14 - Vista superior da plaqueta.

Fonte: Adaptado de BALANIS (2005).

O cálculo dos tamanhos físicos da antena de microfitas de *patch* retangular, comprimento e largura, é feito através das Equações 5 e 6, respectivamente.

$$L = \frac{c}{2f_r \sqrt{\epsilon_{ref}}} - 2\Delta L \quad (5)$$

$$W = \frac{c}{2f_r} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad (6)$$

Onde f_r é a frequência de ressonância e c é a velocidade da luz, que corresponde a velocidade na qual as ondas eletromagnéticas se propagam no vácuo.

Para que o sinal da antena seja emitido de forma eficiente e sem perdas durante sua emissão pela antena é necessário que ela apresente um bom casamento de impedância entre a linha de alimentação e o *patch* da antena (BALANIS, 2005).

O casamento de impedância é baseado no teorema da máxima transferência de potência, que diz, a máxima transferência de potência ocorre quando a resistência de carga é igual à resistência do equivalente de Thévenin (NILSSON; RIEDEL, 2009).

Aplicando esse teorema da máxima transferência de potência para os circuitos de antenas implica em que a resistência de carga representa o *patch* e a resistência equivalente de Thévenin a linha de transmissão.

A largura da linha de alimentação de microfita é definida como W_0 e é obtida a partir da Equação 5.

$$Z_c = \begin{cases} \frac{60}{\sqrt{\epsilon_{ref}}} \ln \left[\frac{8h}{W_0} + \frac{W_0}{4h} \right], & \frac{W_0}{h} \leq 1 \\ \frac{120\pi}{\sqrt{\epsilon_{ref}} \left[\frac{W_0}{h} + 1,393 + 0,677 \ln \left(\frac{W_0}{h} + 1,444 \right) \right]}, & \frac{W_0}{h} > 1 \end{cases} \quad (7)$$

Na Equação 7 Z_c é a impedância da linha de microfita, normalmente convencionada como 50 Ω . Como a espessura do substrato é muito pequena, se utiliza a segunda parte da Equação 7, para condição da razão entre a espessura da linha e a espessura do substrato ser maior que 1.

Uma técnica utilizada para melhorar o casamento de impedância é uso de *inset fed*. O *inset fed* corresponde a um corte físico que introduz uma capacitância de junção que influencia na frequência de ressonância da antena (BALANIS, 2005).

O comprimento do *inset fed* é calculado através da Equação 8, para valores de permissividade relativa entre 2 e 10 (RAMESH; YIPI, 2003). A Figura 15 ilustra o comprimento do *inset fed* e a largura da linha de microfita.

$$y_0 = 10^{-4}(0,001699\varepsilon_r^7 + 0,13761\varepsilon_r^6 - 6,1783\varepsilon_r^5 + 93,187\varepsilon_r^4 - 682,69\varepsilon_r^3 + 2561,9\varepsilon_r^2 - 4043\varepsilon_r + 6697) \frac{L}{2} \quad (8)$$

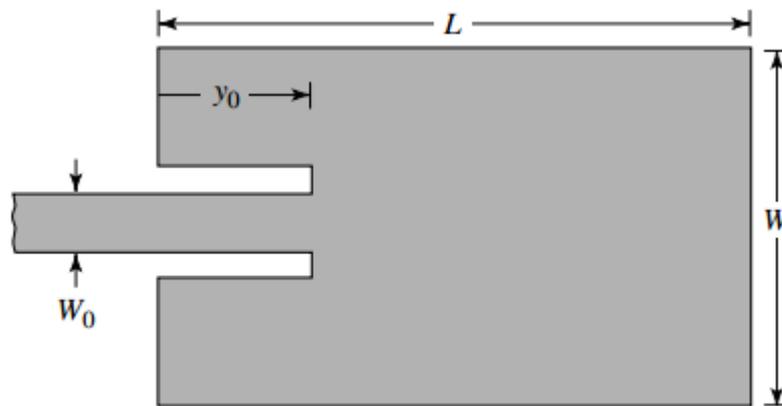


Figura 15 - Linha de alimentação com inset fed.

Fonte: Adaptado de BALANIS (2005).

2.4. ANTENA MONOPOLO

Monopolo é um tipo de antena formada por metade de uma antena de dipolo com a outra parte do dipolo substituído por um plano de terra que forma um ângulo reto com a parte restante. Para planos de terras muito grandes o comportamento da antena de dipolo se assemelha ao de uma antena de dipolo pois o plano de terra reflete a parte do sinal que seria feita pela metade que falta do dipolo. Para o caso do plano de terra com extensão infinita e condutividade infinita, a antena de monopolo pode ser modelada pelo método das imagens como um dipolo com metade da impedância de entrada e o dobro da diretividade do dipolo. Com um plano de terra infinito, é bloqueada toda a radiação abaixo do plano de terra da antena, porém a parte de cima da radiação do monopolo é idêntica ao hemisfério superior da radiação da antena de dipolo (SARAEREH, 2007).

Para uma antena monopolo com um plano de terra finito, a borda externa do plano de terra difrata a radiação incidente em todas as direções, modificando as correntes no plano de terra. Na borda externa do plano de terra as correntes nas faces superior e inferior são iguais em magnitude, mas opostas em direção porque o somatório das correntes na borda tem que ser igual a zero. Quanto menor o tamanho do plano de terra da antena de monopolo maior será a difração da borda externa. A difração da borda pode alterar a impedância de entrada da antena em até 3dB e alterar a diretividade no plano do plano de terra em mais de 6dB em comparação com um plano de terra infinito (SARAEREH, 2007).

A antena monopolo apresenta algumas diferenças da antena de dipolo. Ambas as antenas requerem dois terminais, porém apenas a antena de monopolo possui plano de terra. O padrão de radiação da antena de dipolo tem um diagrama omnidirecional, a antena monopolo apresenta um diagrama parecido exceto por não possuir simetria no plano vertical (FUSCO, 2007).

As antenas monopolo tem seu projeto baseados no comprimento de onda da frequência de ressonância desejada. As antenas de monopolo apresentam suas dimensões baseadas em $\lambda_g/4$, um quarto do comprimento de onda, para o comprimento do monopolo. A linha de alimentação do monopolo convencionalmente apresenta sua largura igual a largura da linha de monopolo impressa (FUSCO, 2007).

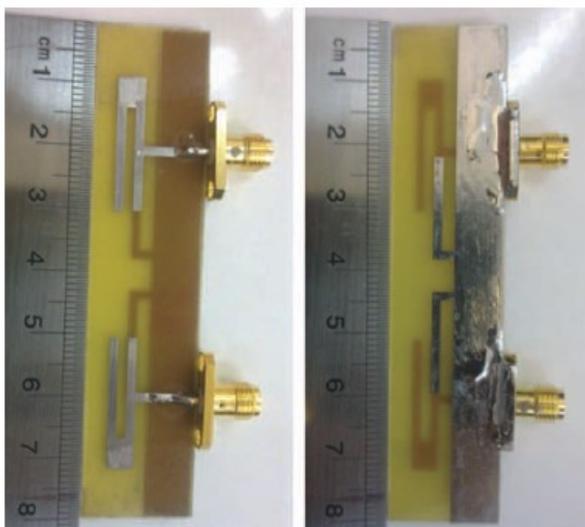
2.5. ESTUDOS ACERCA DE MIMO E MIMO MASSIVO

Os modernos sistemas de comunicações sem fio atuais exigem uma alta taxa de dados em canais com banda larga limitada. O sistema MIMO, devido a sua alta eficiência de radiação, vem sendo foco de vários estudos recentes, pois usa diversas antenas que em conjunto são capazes de aumentar a capacidade do canal sem comprometer o espectro adicional ou a potência transmitida. Diante do exposto, muitos trabalhos foram desenvolvidos no que se refere as propriedades das antenas MIMO, nos quais serão abordados no decorrer deste tópico.

O sistema MIMO desenvolvido por Foudazi, Mallahzadeh e Nezhad (2011), consistia em uma antena de banda tripla para aplicação em WLAN e WiMAX, na qual garantiu uma eficiência de radiação maior que 90%. A antena de banda tripla constituía-se de uma antena monopolar em forma de C, funcionando como uma antena ressonante de banda dupla, e uma estrutura parasita em forma de L em seu plano de terra, no qual é projetada para alcançar a três modos e aprimorar o isolamento entre duas portas no sistema MIMO.

O substrato da antena foi projetado com as dimensões de 18 x 40 mm² e seu protótipo foi feito em FR4 com $\epsilon_r = 4,4$, $\tan \delta = 0.02$ e $h = 1$ mm. O protótipo possui o elemento radiante *dual-band* alimentado por uma linha de microfita. A largura da linha possui 1,86 cm para poder se obter uma impedância característica de 50 Ω . A Figura 16 mostra o protótipo do sistema MIMO de banda tripla construído.

Figura 16 - Protótipo de sistema MIMO de banda tripla.



Fonte: Adaptado de Foudazi, Mallahzadeh e Nezhad (2011).

O protótipo construído apresentou características de baixo acoplamento mútuo, bom casamento de impedância, baixo coeficiente de correlação de envelope, alta eficiência de radiação e padrões estáveis de radiação. Se mostrando assim viável para uso em sistemas WLAN e WiMAX MIMO. A antena

proposta abrangeu as faixas WLAN de 2,4/5,8 GHz e WiMAX de 2,5 / 3,3 / 3,5 / 3.7 e 5,5 GHz.

Larsson et al. (2014) mostraram em artigo a importância do MIMO massivo, trazendo uma visão geral dessa tecnologia. Dentre as vantagens dessa tecnologia, expostas pelos autores, estão: melhores taxas de transferência e na eficiência de energia de radiação; uso de componentes de baixo consumo e baixo custo; latência reduzida; não necessita de um ambiente de dispersão abundante; é uma tecnologia resistente à falha de uma ou mais unidades de antenas.

De acordo com Larsson et al. (2014, p. 4), o MIMO massivo pode substituir amplificadores ultra lineares caros de 50 W, utilizados em sistemas convencionais de telecomunicação, por centenas de amplificadores de baixo custo com potência de saída na faixa de 10^{-3} W. Os designs convencionais de arranjos de antenas utilizam poucas antenas nas quais são alimentadas por amplificadores de alta potência; esse tipo de sistema possui vários itens caros e de grande tamanho físico, além da necessidade de grandes cabos coaxiais, com mais de 4 cm de diâmetros. Os designs convencionais podem ser substituídos pelo MIMO massivo, pois essa tecnologia reduz as restrições de precisão e linearidade de cada amplificador individual e cadeia RF. É válido ressaltar que a tecnologia MIMO massivo trabalha com uma potência total de RF de saída com duas ordens de magnitude menor do que os designs convencionais de arranjo de antenas, garantindo uma melhor eficiência energética.

Os sistemas de comunicação *wireless* convencional pode apresentar falha quando uma determinada informação percorre vários caminhos até que se chegue ao terminal, isso pode ocasionar interferências destrutivas pela superposição de ondas nesses vários caminhos. Essa falha em sistemas sem fio dificulta a criação de links sem fio de baixa latência. Entretanto, os sistemas de MIMO massivo são constituídos por grandes quantidades e formas de feixe o que contribui na minimização dessas falhas, fazendo com que não ocasione mais limitação na criação desses links. (Larsson et al., 2014, p. 4).

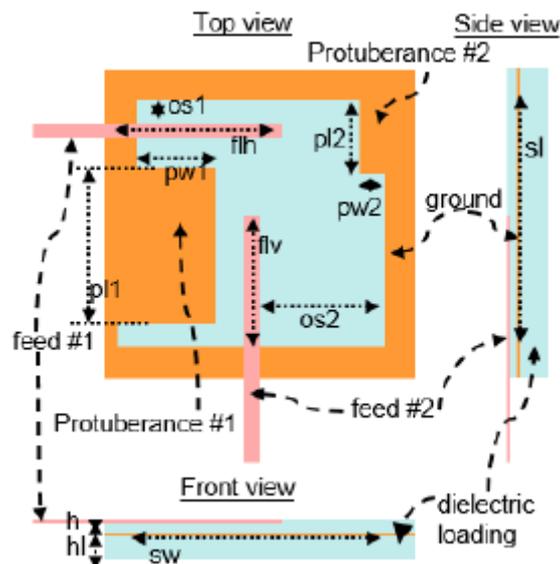
Ainda com Larsson et al. (2014, p. 9), diante da importância destacada em seu trabalho, é válido que se ressalte o grande potencial destacado dos

sistemas de MIMO massivo para a tecnologia 4G. Tal tecnologia colabora com as vantagens em termos de eficiência energética, eficiência espectral, robustez e maior confiabilidade, pois a ineficiência energética de *hardwares* caros pode ser substituída pelo uso de sistemas de baixo custo de MIMO massivo que garantem eficiência energética.

Dumanli et al. (2015) desenvolveram uma antena *slot* MIMO 2x2 de banda larga para *Wi-Fi* 5G. A antena apresenta formato quadrado com portas duplas, com duas linhas de alimentação ortogonais de microfita assimétricas. Uma das portas cobre a banda 802.11ac com uma largura de banda de 13%, enquanto que a outra porta possui uma fração de 26% da largura de banda.

O design da antena construída apresenta uma forma quadrada de $0,4\lambda$ por $0,4\lambda$, modelada em substrato FR4 de 0,4 mm de espessura. Através da Figura 17, é possível observar que as linhas de alimentação são inseridas na face superior da antena e que o *slot* se situa na face inferior.

Figura 17 - Antena *slot* quadrada com duas linhas de alimentação.



Fonte: Adaptado de Dumali et al. (2014).

O alimentador 1 da Figura 17, excita a borda superior do *slot* em 5 GHz, enquanto que a linha de alimentação atua como um radiador com frequência próxima a 6 GHz. Com isso, a largura da ranhura “sw” e o comprimento de

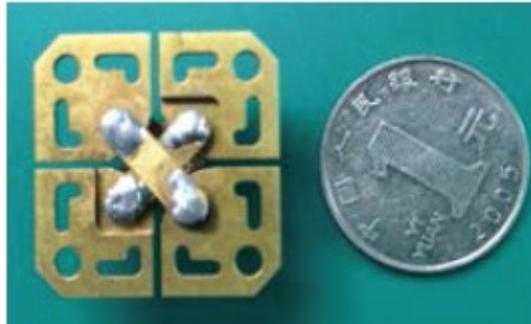
alimentação 1 “*flh*” controlam a frequência de operação do alimentador 1. O alimentador 2 excita o *slot* em uma frequência em torno de 5,5 GHz e o comprimento de borda inferior controla a frequência de operação do seu *slot*, enquanto o comprimento do *slot* “*s*” juntamente com o comprimento de alimentação 2 “*flv*” controlam o acoplamento entre as alimentações. Os parâmetros da antena são otimizados para garantir uma reflexão inferior a -10 dB em uma faixa de ISM de 5 GHz nas duas portas. (Dumali et al., 2014, p. 1)

O trabalho desenvolvido por Dumanli et al. (2014) garantiu que a largura de banda em -6 dB do coeficiente de reflexão das antenas cobrisse toda banda 802.11ac 5GHz, além de alcançar uma eficiência de 86% com sistema MIMO 2x2.

A aplicação de arranjos antenas também foram utilizadas para um sistema MIMO massivo em comunicação 5G. Esse projeto foi desenvolvido por Yuan et al. (2016) no qual uma antena dipolo de dupla polarização fora modelada por meio de cálculo numérico de elementos finitos, possuindo uma faixa de frequência operacional de 3,5 a 5,2 GHz; posteriormente projetou-se antenas da matriz com base no *subarray* de 16 unidades de antenas.

O modelo criado por Yuan et al. (2016), Figura 18, possui dimensões de 27,2 mm de comprimento, 27,2 mm de largura e 17 mm altura. O espaço entre os braços da antena é de 0,8 mm e a placa de alimentação é posta transversalmente com dimensões de 10 mm x 3,2 mm x 0,8 mm. É utilizado também um *balun* na forma cilíndrica oca com altura de 15 mm. O tamanho do plano de terra é de 75 mm x 60 mm e altura de 12 mm e é alimentada por uma sonda coaxial de 50Ω. A Figura 18 mostra o modelo de elemento de arranjo.

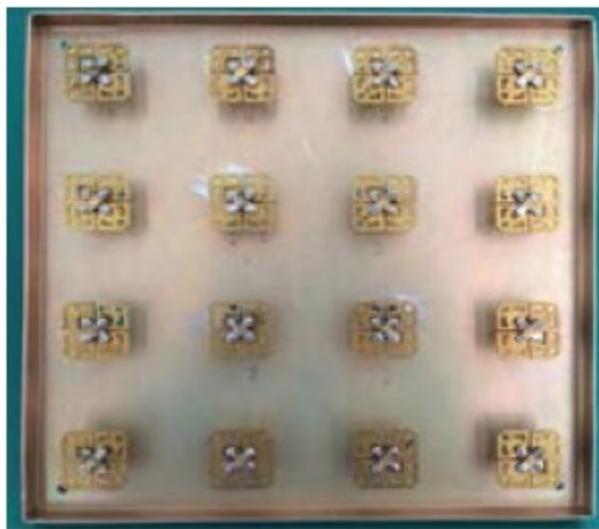
Figura 18 - Antena dipolo de polarização dupla.



Fonte: Adaptado de Yuan et al. (2016).

O arranjo de antenas é apresentado na Figura 19, contendo 16 elementos de antena dispostos por 4x4 elementos.

Figura 19 - Desing modular *sub array* de 16 antenas dipolo de polarização dupla.

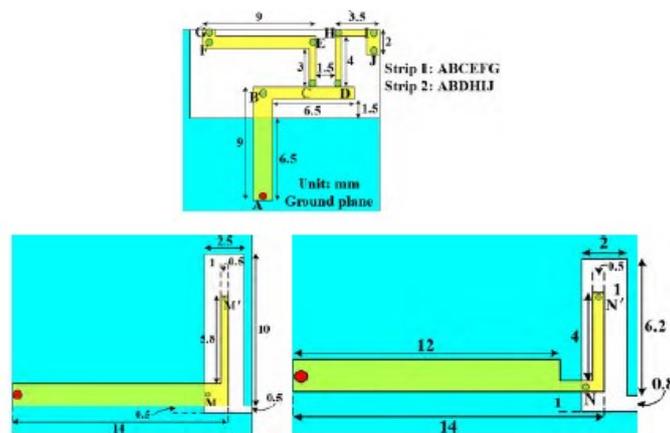


Fonte: Yuan et al. (2016).

Diante disso, o projeto de antenas de Yuan et al. (2016) garantiu a frequência de 3,5 a 5,5 GHz; largura de banda relativa de 39%, VSWR menor que 1,5; ganho de 8.8 dB; coeficiente de correlação de 0,42 e ganho arranjo com 64 elementos maior que 24 dB. A antena desenvolvida garantiu vantagens como a de formação integrada, design modular, banda larga, baixa correlação e alto ganho.

O trabalho desenvolvido por Li et al. (2017) trata-se da modelagem e construção do protótipo de um sistema MIMO massivo de 12 portas em um aparelho celular para telefonia 5G com operação abaixo de -6 dB para bandas LTE 42 / 43 / 46. Nesse projeto a antena MIMO proposta é desenvolvida com três elementos de antenas diferentes: antena invertida em forma de π ; antena de *slot* em formato de L invertido curto e antena de *slot* em formato de L invertido longo; como mostra de forma respectiva a Figura 5.

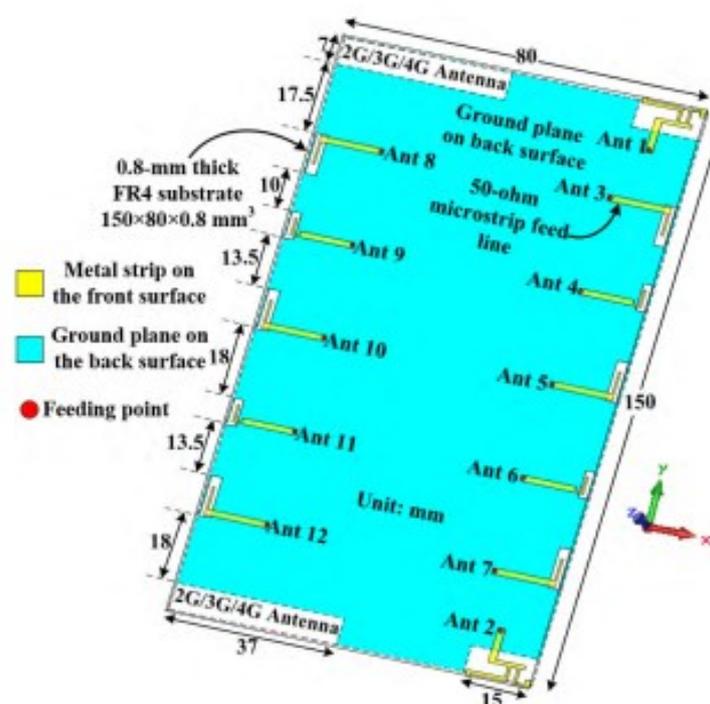
Figura 20 - Elementos de antena MIMO.



Fonte: Adaptado de Li et al., 2017.

O projeto de Li et al. (2017) apresenta oito elementos de antenas os quais são usados para MIMO 8 x 8 em bandas LTE 42 / 43 e seis elementos de antenas são projetados para MIMO 6 x 6 na banda LTE 46. Diante disso, a antena obteve satisfatórios coeficientes de reflexão, inferiores a -6 dB e isolamentos aceitáveis inferiores a -12 dB. Além disso apresentou os seguintes parâmetros: eficiência total para cada elemento de antena entre 40% para banda LTE 42 / 43 e 45% para bandas LTE 46; coeficiente de correlação do envelope de dois elementos da antena inferior a 0,15; capacidade de canal ergódico de 34 – 37 bps/Hz, para LTE 42 / 43 e 26,5 – 29,5 bps/Hz para LTE 46. Os resultados de capacidade do canal da antena sugerem que seu potencial de multiplexação é superior à do tipo MIMO 2 x 2 e que sua aplicação é bastante viável para multibanda 5G. O MIMO massivo 12x12 é ilustrado na Figura 21.

Figura 21 - MIMO massivo 12x12.



Fonte: Adaptado de Li et al., 2017.

O trabalho de Chen et al. (2017) analisou matrizes finitas de antena em um sistema MIMO massivo, comparando antenas de *patch* versus dipolo. Foi constatado que uma matriz finita possui forte variação no padrão de ganho dos diferentes elementos da antena, isso é ocasionado pelo acoplamento mútuo e pelo efeito de borda dependendo também do ângulo de chegada. Foi observado que a variação de ganho é maior em uma matriz dipolo, pois possui um acoplamento mútuo mais forte. Constatou-se que a potência do conjunto não é a mesma para todos os usuários.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo é reservado para apresentar o projeto proposto pelo trabalho utilizando a abordagem literária. A proposta é observar o desempenho de uma antena monopolo, sua faixa de operação e após sua validação, posteriormente aumentar a quantidade de elementos construindo um sistema MIMO e analisar seu comportamento quanto aos parâmetros de antena. Foi construído um elemento de antena monopolo, depois foram adicionadas outras antenas monopolo ao sistema até completar 64 elementos para um sistema MIMO Massivo.

A antena base proposta por esse trabalho, que compõe o sistema MIMO, é uma antena de monopolo impressa em microfita com frequência de ressonância de 3,5GHz. Essa frequência escolhida para projeto é devido a futura aplicação 5G no Brasil, que é especificada a partir do protocolo ITU 5G/IMT-2020 que determina os parâmetros da faixa operação.

O cálculo das dimensões físicas do monopolo impressa em microfita é apresentado no Capítulo 2.4, e foi utilizado para determinar os elementos de antena do sistema MIMO. O modelo do elemento de antena base foi inicialmente proposto por Moraes (2011).

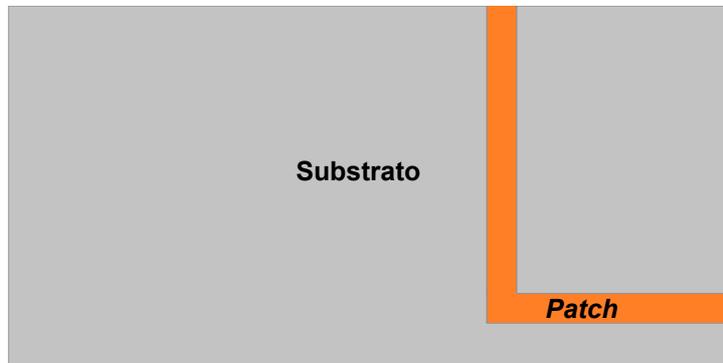
Algumas características da antena proposta por ele apresentavam divergências quanto a aplicação deste trabalho, portanto foram feitas modificações de seu formato e sua estrutura para adequação à uma nova aplicação. Foi aplicada à antena um fator de compactação (F. C.) para definir uma nova frequência de ressonância para a antena, alterando assim o tamanho físico desta. Esse fator de compactação foi proposto por Oliveira (2008) e é dado pela Equação 18.

$$F. C. = \frac{f_{res(simulada)}}{f_{res(desejada)}} \times 100 \quad (18)$$

O novo tamanho de antena alterou as características dela de capacitância e indutância da antena e modificando o seu casamento de impedância com sua linha de alimentação. A antena de monopolo apresenta a mesma largura, para linha alimentação e largura do *patch*. Foi adicionado um toco à sua estrutura

para adequar a capacitância e indutância da antena de acordo com a impedância da linha de alimentação, objetivando um melhor casamento de impedância. O *patch* da antena sem o toco apresenta a geometria ilustrada na Figura 22.

Figura 22 – Patch da antena de monopolo sem toco.



Fonte: Autoria própria.

O casamento de impedância foi feito a partir da inserção de um toco à estrutura do *patch*, suas dimensões e localização no *patch* foram determinados de forma paramétrica com a função *optmetrics* do software HFSS®. O casamento de impedância foi feito para uma impedância de entrada da antena de 50Ω. O toco apresenta dimensões de 5 mm de comprimento e 0,6 mm de largura, a mesma largura da linha de alimentação. O toco é localizado a 3,7 mm de distância do ponto de alimentação da antena.

A antena de monopolo possui dimensões físicas 7,5mm de largura (L_2), 15mm de comprimento (L_1), 1,54mm de espessura do substrato (h) e um dielétrico de FR4 (fibra de vidro) com constante dielétrica (ϵ_r) de 4,4. A frequência escolhida, de 3,5GHz, é uma das faixas destinadas a futura aplicação 5G no Brasil, assim como a de 2,3G.

A Figura 23 ilustra o *patch* da antena monopolo e a Figura 24 seu plano de terra.

Os valores de comprimento e largura referente às Figura 23 e Figura 24 são mostrados na Tabela 1.

Tabela 1 - Parâmetros da antena

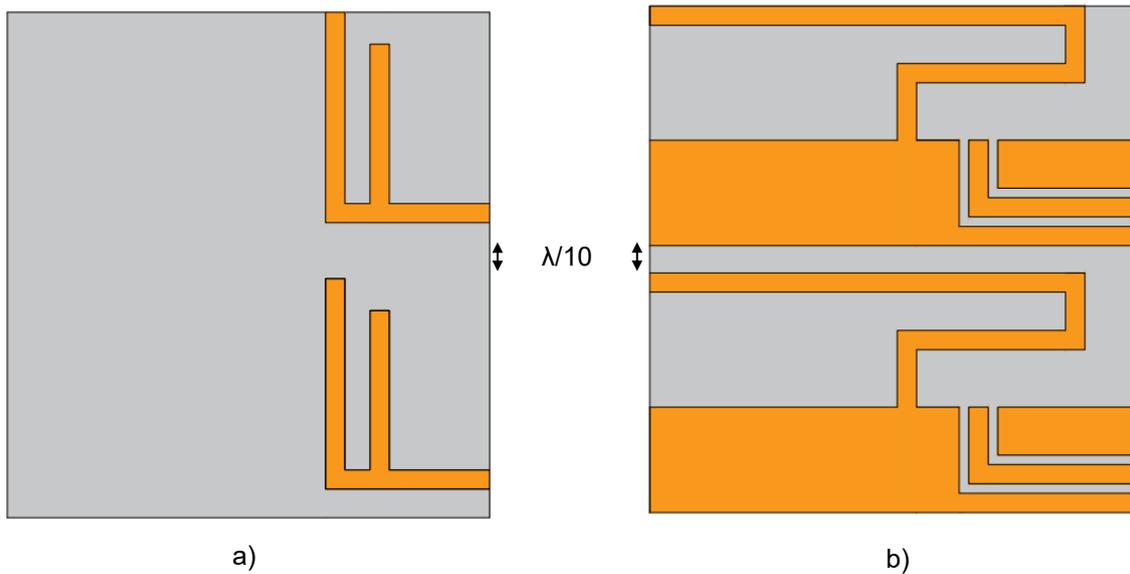
Parâmetros	Valor em mm
L ₁	15
L ₂	7,5
L ₃	2,4
L ₄	0,6
L ₅	9,6
L ₆	4,2
L ₇	0,3
L ₈	1,5
L ₉	12,9
L ₁₀	5,2
L ₁₁	1,3
L ₁₂	5,1
L ₁₃	6,6
L ₁₄	5
L ₁₅	0,8

Fonte: Autoria própria.

De posse das dimensões da antena de monopolo, foi obtido o primeiro sistema MIMO com arranjo 2x2, o que representa um sistema com duas antenas e duas alimentações, uma alimentação individual para cada antena. Para o sistema MIMO foi adicionado, ao mesmo substrato, duas antenas de monopolo separadas por um espaçamento entre elas. Essa distância entre as antenas é chamada de Coeficiente de Correlação de Envelope (CCE) que objetiva minimizar ou eliminar a interferência entre as antenas do sistema, uma vez que elas não emitem necessariamente o mesmo sinal. Esse coeficiente foi citado no Ítem 2.1.2 onde mostra a necessidade e importância de sua determinação. O CCE é calculado pela Equação 1 e foi determinado um valor de 10% do comprimento de onda (λ), o que representa uma distância de 0,8571mm, para o sistema MIMO deste trabalho.

O sistema MIMO 2x2 é ilustrado na Figura 25 - a) *Patch* MIMO 2x2, b) Plano de terra MIMO 2x2., e mostra a disposição do *patch* e do plano de terra no substrato, bem como o espaçamento entre eles.

Figura 25 - a) Patch MIMO 2x2, b) Plano de terra MIMO 2x2.



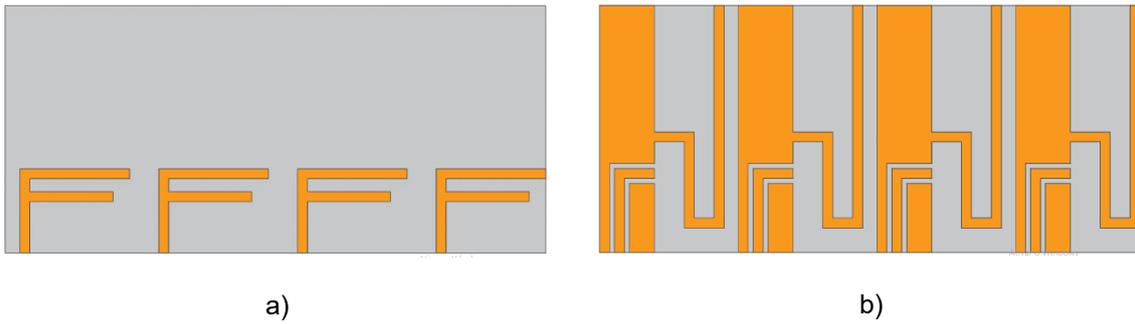
Fonte: Autoria própria.

Após feitas simulações com o primeiro sistema MIMO e feita a validação do método, então, foram feitas a adição outros elementos de antena a fim de melhorar o sistema até obter uma quantidade massiva de elementos de transmissão e recepção.

Foram feitos teste aumentando a quantidade de elementos no sistema para averiguar a correspondência de desempenho. De acordo com o CCE calculado os elementos de antena no substrato não teriam interferência relevante para o sistema, não interferindo entre a transmissão e recepção de cada elemento de antena do sistema. Assim, foi feito o aumento gradativo de elementos no sistema, sempre duplicando sua quantidade de entradas e saídas.

Após o primeiro sistema MIMO 2x2, ilustrado na Figura 25, foi simulado um sistema MIMO 4x4 para acompanhar o desempenho do sistema com a adição de elementos de antena no sistema e averiguar sua operação quanto a faixa de frequência desejada. O sistema MIMO 4x4 simulado é ilustrado na Figura 26

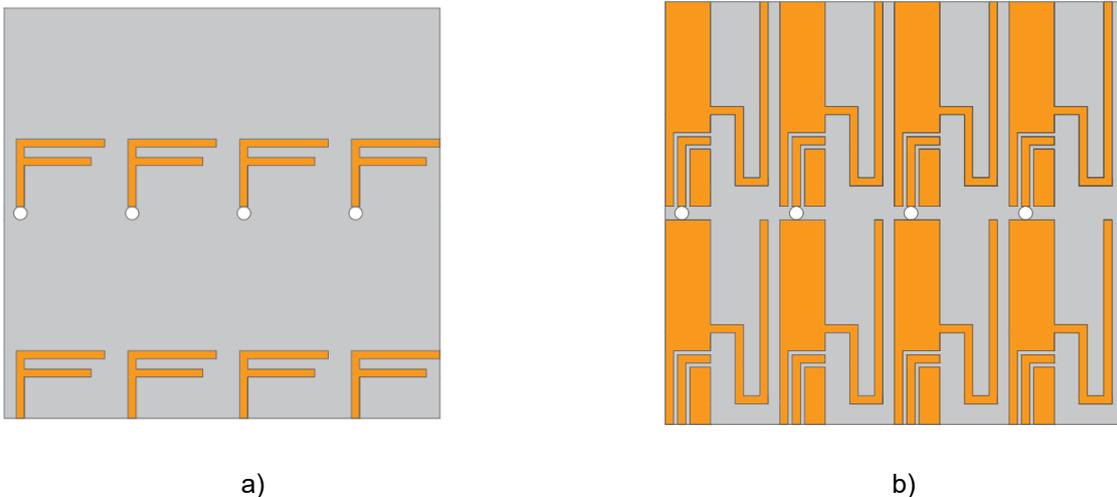
Figura 26 - a) Patch MIMO 4x4, b) Plano de terra MIMO 4x4.



Fonte: Autoria própria.

Foram feitas, em diante, mais três simulações de sistema MIMO até se chegar ao objetivo de um MIMO Massivo 64x64. A progressão do sistema foi feita duplicando-se o número de entradas e saídas do sistema, portanto, a próxima simulação foi de um MIMO 8x8, que é ilustrado na Figura 27.

Figura 27 - a) Patch MIMO 8x8, b) Plano de terra MIMO 8x8.



Fonte: Autoria própria.

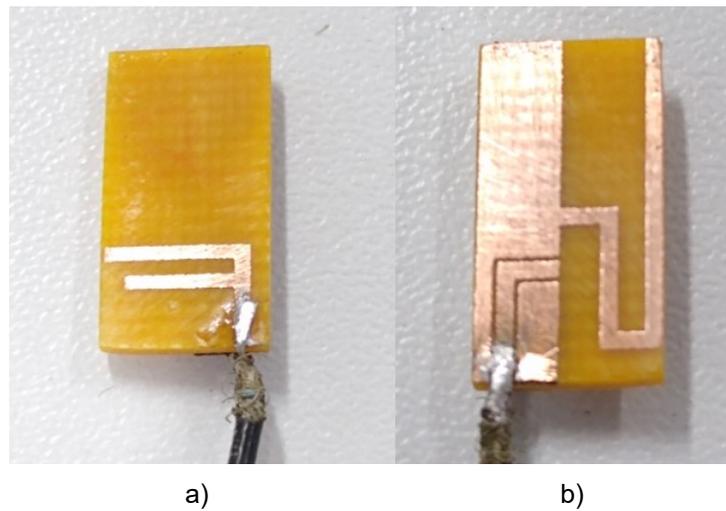
A partir do sistema MIMO 8x8 algumas antenas apresentam sua disposição no meio do substrato, com isso inviabiliza a alimentação da antena em sua simulação e construção. Assim foram feitos furos no substrato para solucionar o problema com a alimentação do sistema. Cada furo possui um raio de 0,5mm e sua extremidade é localizada no ponto de alimentação de cada antena de modo que a retirada do material fosse apenas do substrato, a fim de não interferir nas geometrias do *patch* ou plano de terra de cada antena.

Em sequência, foi feita a tentativa de simulações de sistemas MIMO com matrizes maiores que a 8x8. Devido ao grande número de antenas e suas respectivas alimentações o *software* computacional HFSS® requer uma grande quantidade de memória RAM do computador para simulação e processamento dos dados. Nos sistemas MIMO 16x16, 32x32 e 64x64 não foi possível a conclusão das simulações devido ao grande esforço computacional requisitado, dificultando a determinação das raízes do sistema. Portanto, só foi possível a simulação de sistemas até MIMO 8x8.

Realizadas todas as simulações possíveis, foram construídas as antenas de monopolo, MIMO 2x2 e MIMO Massivo 64x64. A antena de monopolo foi construída objetivando conhecer seu comportamento para aplicação no sistema MIMO. O sistema MIMO 2x2 foi construído para validação e conhecimento do sistema MIMO mais simples de forma prática, dando respaldo teórico e prático para a construção do sistema de MIMO Massivo 64x64. Os MIMO 4x4 e 8x8 tiveram apenas seus resultados simulados, pois a sua construção não representa o objetivo do trabalho a fim de explanar sobre a influência do número de elementos em sistema MIMO.

Na construção das antenas foi utilizado uma placa de FR4 como substrato, com ambas as faces cobertas por cobre com espessura de 0,05mm. O desenho foi impresso por uma impressora ultravioleta nas respectivas faces da placa. Em seguinte foi feita a corrosão da parte não coberta pela tinta da impressão, resultando apenas os desenhos do *patch* e plano de terra nas faces de cobre. Para a corrosão foi utilizado perclorato de ferro (FeCl₃). A primeira antena construída foi a antena de monopolo, ilustrada na Figura 28.

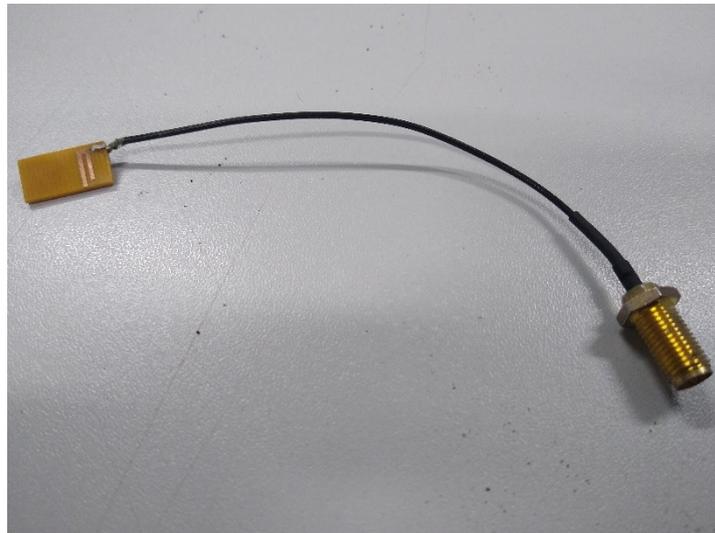
Figura 28 - a) *Patch* da antena monopolo, b) Plano de terra da antena monopolo.



Fonte: Autoria própria.

Devido às pequenas dimensões e a disposição de alimentação da antena, não foi possível a utilização da alimentação via conector SMA. A solução encontrada por esse trabalho foi a utilização de conectores *Pigtail*, ilustrado na Figura 29.

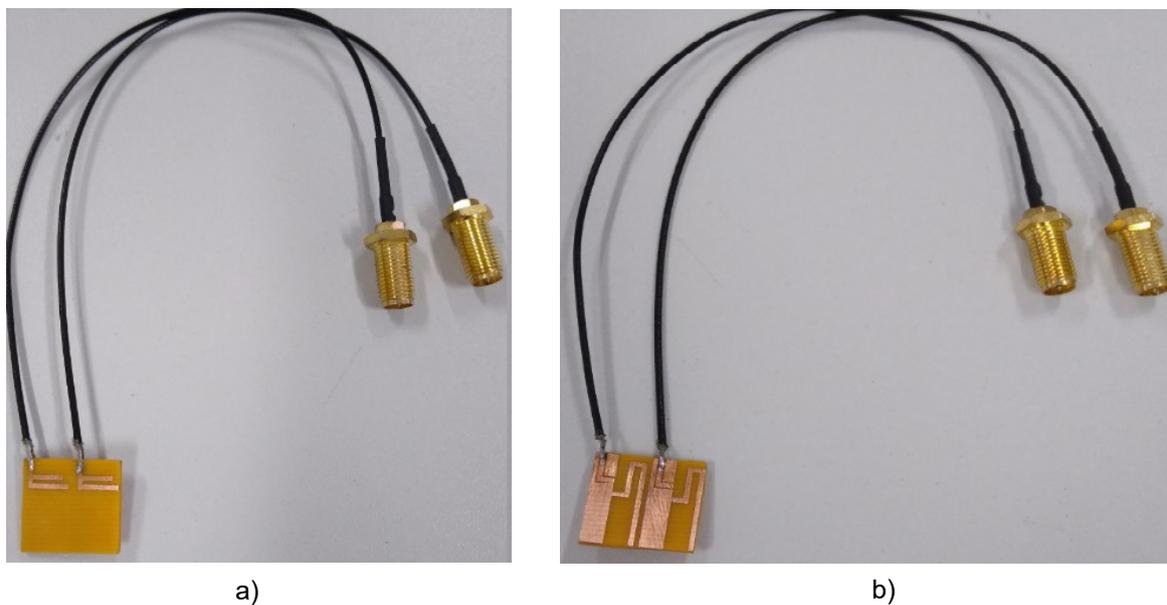
Figura 29 - Antena monopolo com conector *Pigtail*.



Fonte: Autoria própria.

A construção do MIMO 2x2 veio logo em seguida, ilustrado na Figura 30.

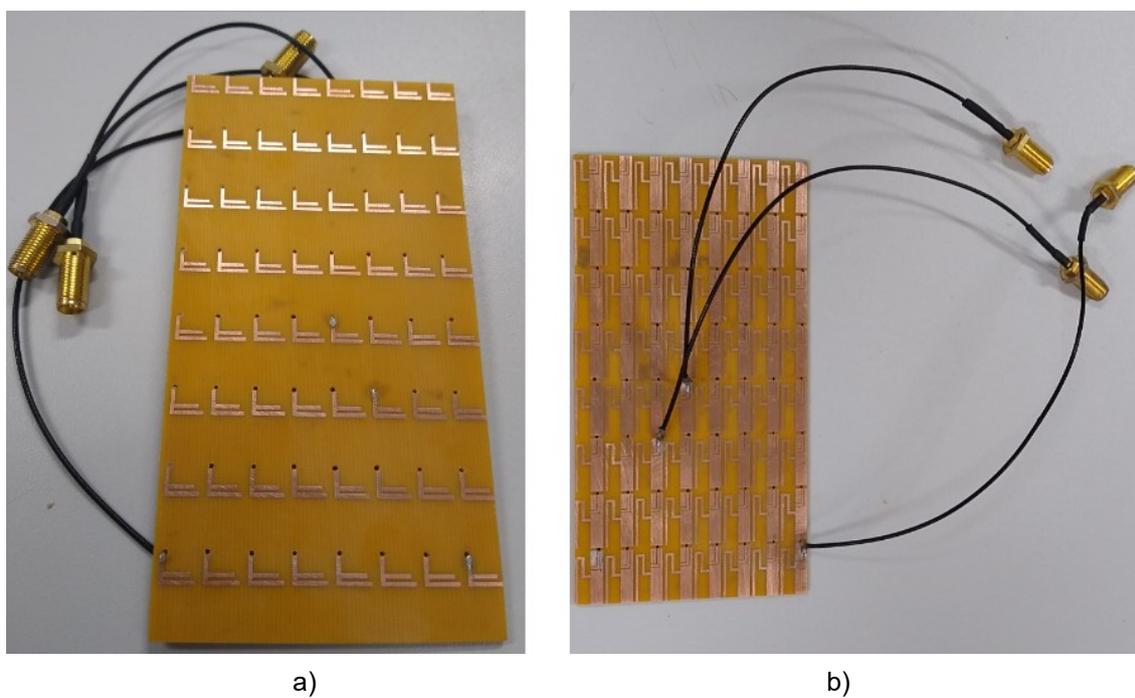
Figura 30 - a) *Patch* da antena MIMO 2x2, b) Plano de terra da antena MIMO 2x2.



Fonte: Autoria própria.

Por último foi realizada a construção do MIMO Massivo 64x64, ilustrado na Figura 31.

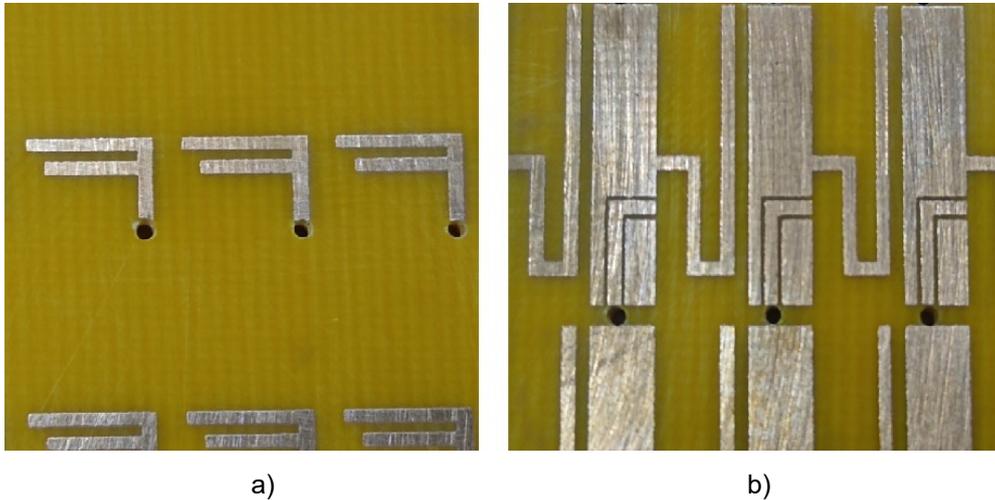
Figura 31 - a) *Patch* da antena MIMO 64x64, b) Plano de terra da antena MIMO 64x64.



Fonte: Autoria própria.

. A Figura 32 ilustra uma vista mais aproximada do MIMO 64x64 para enfatizar o detalhe dos furos para a alimentação.

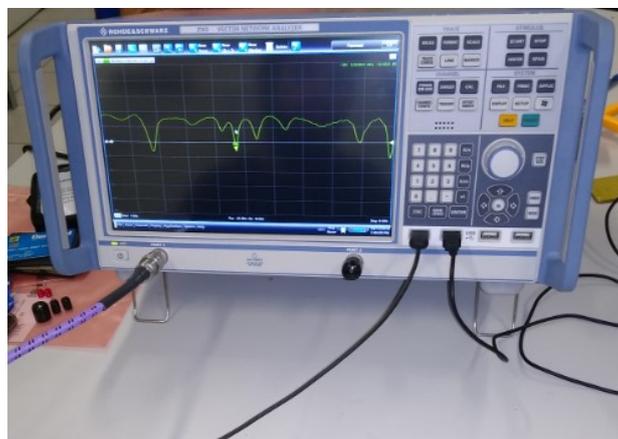
Figura 32 - a) Detalhe do *Patch* MIMO 64x64, b) Detalhe do Plano de terra MIMO 64x64.



Fonte: Autoria própria.

Após construídas todas as antenas, foram feitas as medições dos seus parâmetros utilizando um VNA (*Vector Network Analyzer*) modelo Rohde & Schwarz® ZND. Esse modelo possui uma faixa de operação de 100 kHz a 8 GHz e permitiu obter os valores de coeficiente de reflexão e suas respectivas cartas de Smith. As medições foram feitas em uma faixa de operação de 1 GHz a 5 GHz com o propósito de comparar os coeficientes de reflexão medidos e simulados. O VNA utilizado é ilustrado na Figura 33.

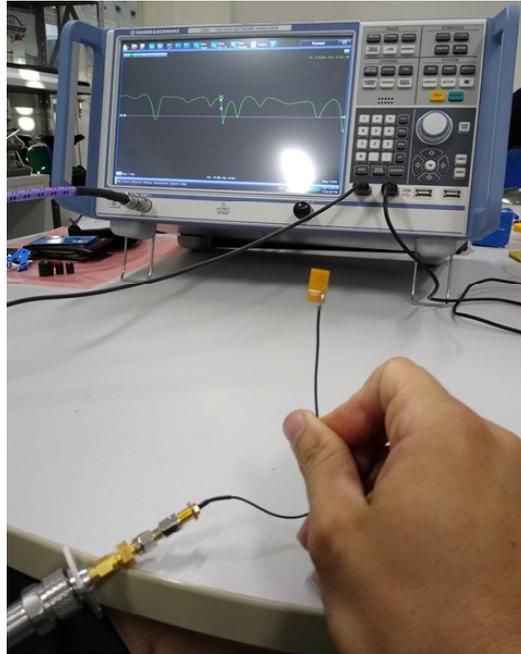
Figura 33 - VNA Rohde & Schwarz ZND.



Fonte: Autoria própria.

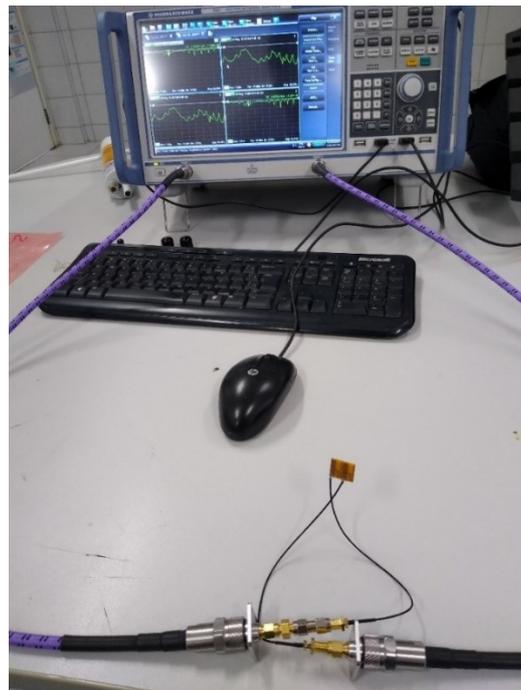
As medições das antenas realizadas através do VNA descrito anteriormente são ilustradas nas Figura 34, Figura 35 e Figura 36, antena de monopolo, sistema MIMO 2x2 e sistema MIMO 64x64, respectivamente.

Figura 34 - Medição da antena de monopolo com VNA Rohde & Schwarz® ZND.



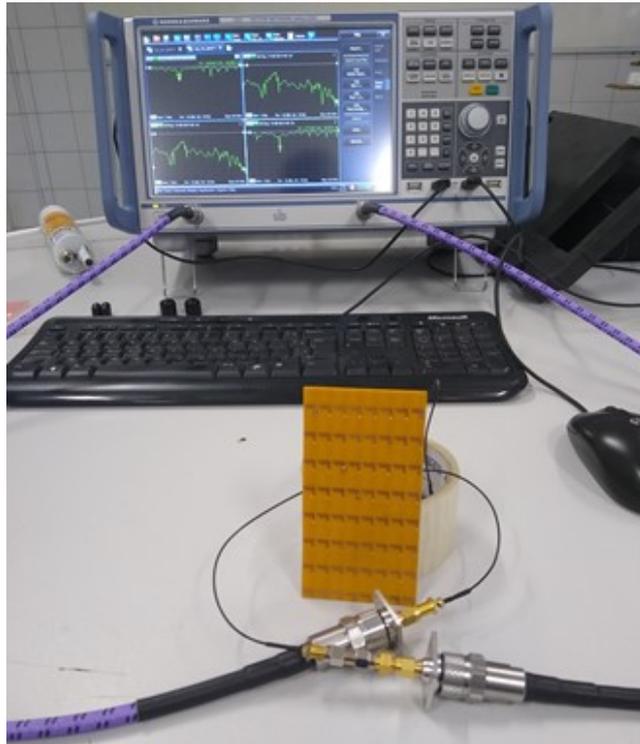
Fonte: Autoria própria.

Figura 35 - Medição do sistema MIMO 2x2 com VNA Rohde & Schwarz® ZND.



Fonte: Autoria própria.

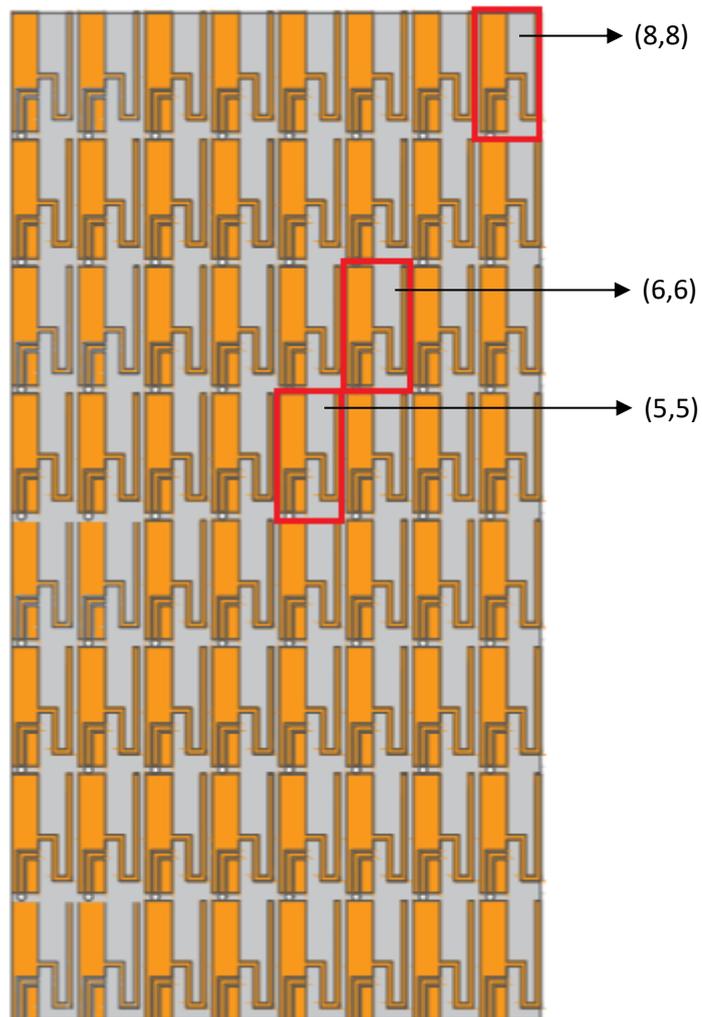
Figura 36 - Medição do sistema MIMO Massivo 64x64 com VNA Rohde & Schwarz® ZND.



Fonte: Autoria própria.

As medições do MIMO massivo 64x64 foram feitas de pontos estratégicos. Como o VNA utilizado apresentava apenas 2 entradas, então, para um sistema com muitas antenas era necessário se fazer a medição de cada elemento de antena com todos os outros elementos, o que resultaria em 4096 medições com apenas duas entradas. De forma a evitar essa numerosa quantidade de medições foi proposto uma medição de elementos do meio da matriz de antenas e a sua interação com sua fronteira e com as antenas da borda do MIMO. A Figura 37 mostra as antenas na quais foram feitas as medições e suas referências de posição na matriz.

Figura 37 - Antenas Medidas do MIMO massivo 64x64.



Fonte: Autoria própria.

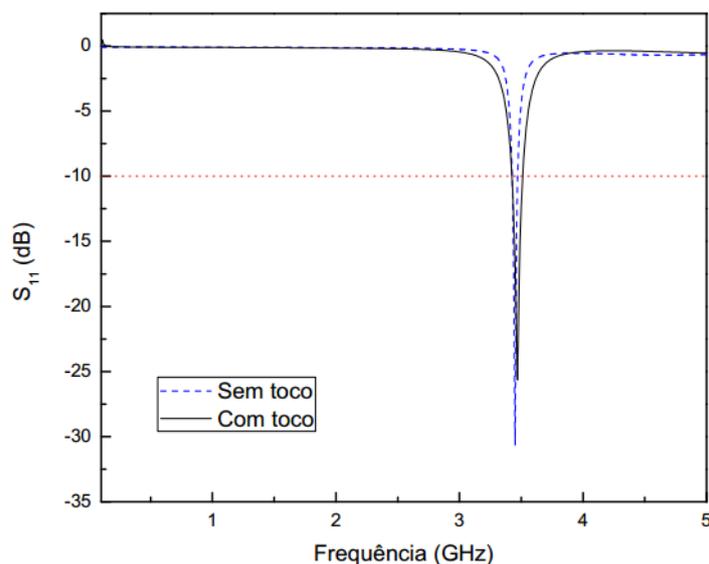
A Figura 37 mostra os elementos (8,8), (6,6) e (5,5), esses nomes foram dados de acordo com as suas posições na matriz de antenas, pois o elemento (8,8) está na oitava fileira e oitava coluna, e assim sucessivamente. As medições foram feitas entre esses elementos pois garantindo que os elementos centrais e os elementos da borda não possuem interferência, respalda que todos os elementos que estão inclusos nesse intervalo entre eles também não apresentarão interferência, pois será feita a medição entre a menor e maior distância entre as antenas.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo é reservado para a apresentação dos resultados e sua interpretação relacionada aos parâmetros de antena medidos e simulados, descritos no Capítulo 3. Nesta parte do trabalho também é feita a comparação entre os resultados medidos e simulados das antenas monopolo e MIMO 2x2 com a finalidade de comparar o estudo prático com teórico e avaliar quanto a construção das antenas. As antenas MIMO 4x4 e MIMO 8x8 foram apenas simuladas. A antena MIMO 64x64 foi apenas construída apresentando assim apenas resultados medidos.

A primeira análise feita foi para mostrar os resultados da adição do toco à antena de monopolo base para o sistema MIMO. A análise foi quanto ao coeficiente de reflexão das antenas simuladas. A Figura 38 e a Tabela 2 apresentam o comparativo entre os coeficientes de reflexão das antenas monopolo com o toco (*F-shaped*) e sem o toco.

Figura 38 - Coeficiente de reflexão das antenas com toco (*F-shaped*) e sem toco.



Fonte: Autoria própria.

Tabela 2 - Comparação de faixa de operação antenas com toco (F-shaped) e sem toco.

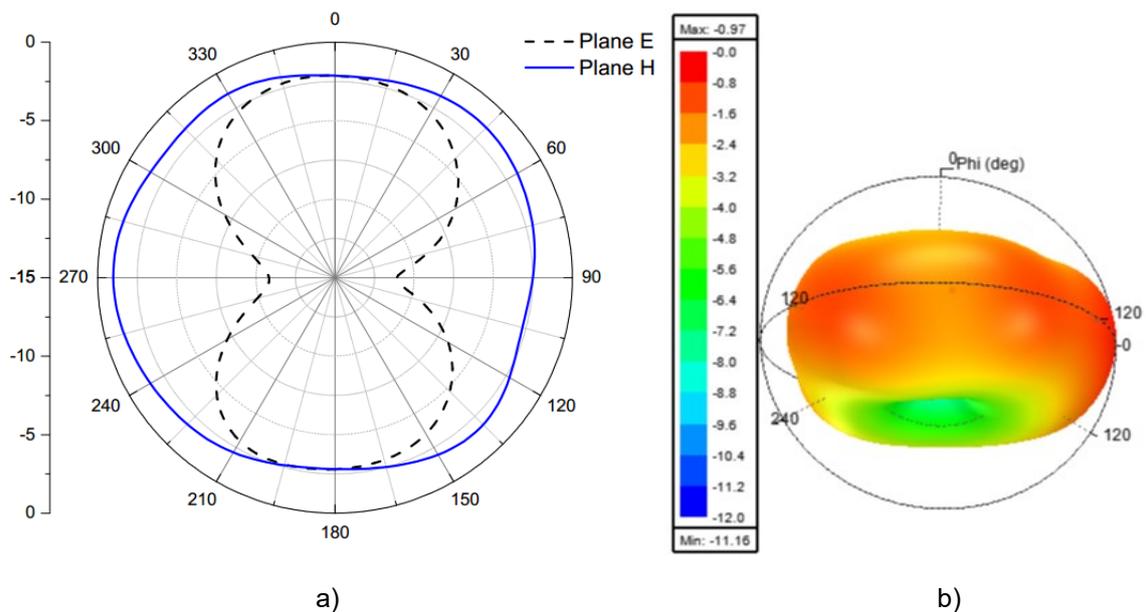
Modo	Frequencia (GHz)	S11 (dB)	BW (Mhz)	BW (%)
Com toco (F-shaped)				
1	3,45 (3,43 – 3,47)	-30,64	40	1,16
Sem toco				
1	3,47 (3,43 – 3,51)	-25,64	80	2,30

Fonte: Autoria própria.

A partir da Tabela 2 pode-se observar que a antena monopolo com o toco não ressoa na faixa de 3,5 GHz, mostrando assim que não serviria para aplicação na tecnologia 5G. Já o coeficiente de reflexão da antena monopolo sem o toco mostra que apesar de sua frequência de ressonância central não ser 3,5 GHz mas essa faixa de frequência encontrasse presente dentro da largura de banda da antena.

Os diagramas de radiação 2D e 3D da antena de monopolo em formato de F foram obtidos por meio de simulação computacional para frequência de 3,5 GHz. A Figura 39 mostra os diagramas de radiação.

Figura 39 - Diagramas de radiação da antena monopolo em forma de F. a) 2D, b) 3D

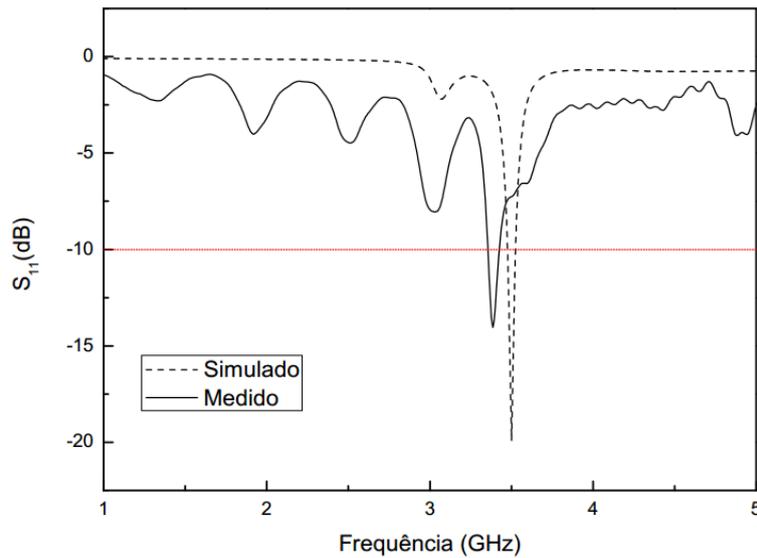


Fonte: Autoria própria.

Através da Figura 39 pode-se observar que a antena de monopolo em formato de F apresentou um comportamento omnidirecional, como previsto. O ganho máximo da antena é de -0,97 dB, potência relativamente baixa, porém satisfatória pela antena apresentar dimensões pequenas. Assim, a antena monopolo apresentou comportamento previsto, de eficiência coerente.

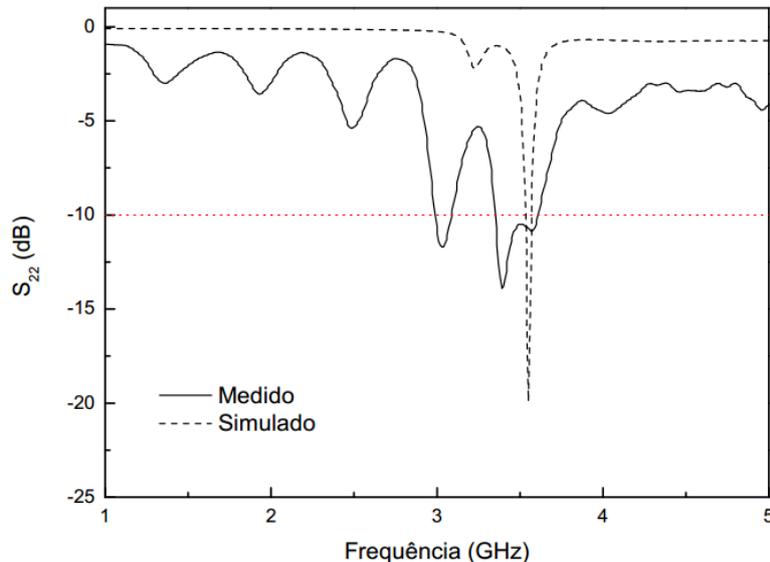
As Figura 40 e Figura 41 apresentam o comparativo entre os coeficientes de reflexão das antenas MIMO 2x2 medidas e simuladas.

Figura 40 – Coeficiente de Reflexão (S_{11}) medido e simulado do sistema MIMO 2x2.



Fonte: Autoria Própria.

Figura 41 - Coeficiente de Reflexão (S_{22}) medido e simulado do sistema MIMO 2x2.



Fonte: Autoria própria.

A Tabela a apresenta as frequências de ressonâncias observadas na Figura, onde os modos e seus valores de largura de banda (BW) são expostos.

Tabela 3 - Comparativo de coeficiente de reflexão (S_{11}) medido e simulado do sistema MIMO 2x2.

Modo	Frequencia (GHz)	S_{11} (dB)	BW (Mhz)	BW (%)
Medido				
1	3,38 (3,36 – 3,42)	-14,03	60	1,17
Simulado				
1	3,5 (3.48 – 3,52)	-25,64	40	1,14

Fonte: Autoria própria.

Tabela 4 - Comparativo de coeficiente de reflexão (S_{22}) medido e simulado do sistema MIMO 2x2.

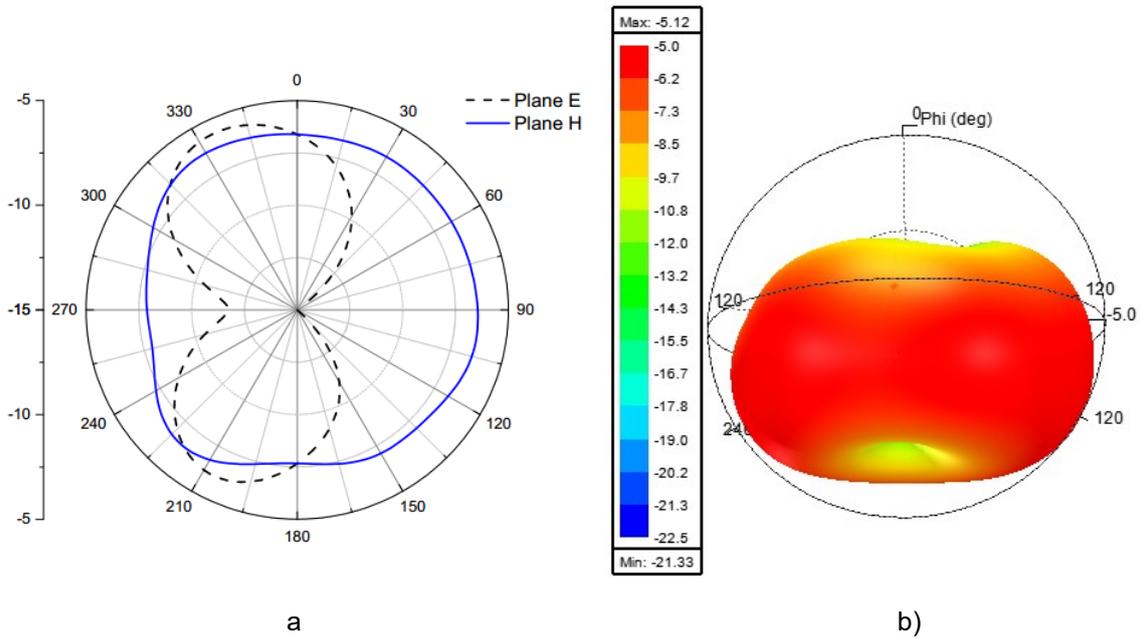
Modo	Frequencia (GHz)	S_{22} (dB)	BW (Mhz)	BW (%)
Medido				
1	3,03 (2,99 – 3,09)	-11,7	100	3,30
2	3,39 (3,36 – 3,5)	-13,9	140	4,12
Simulado				
1	3,55 (3,54 – 3,57)	-19,91	80	0,84

Fonte: Autoria própria.

A partir da Figura 40, Tabela 3, Figura 41 e Tabela 4 pode-se verificar que o sistema MIMO 2x2 apresentou um comportamento medido parecido com o simulado. Algumas alterações nas formas são decorrentes de descasamento na construção da antena. Observa-se que elas operam na faixa próxima a 3,5 GHz, estando dentro de sua largura de banda para operação.

A Figura 42 - Diagramas de radiação do sistema MIMO 2x2. a) 2D, b) 3D. Figura 42 mostra os diagramas 2D e 3D do sistema MIMO 2x2 simulados.

Figura 42 - Diagramas de radiação do sistema MIMO 2x2. a) 2D, b) 3D.

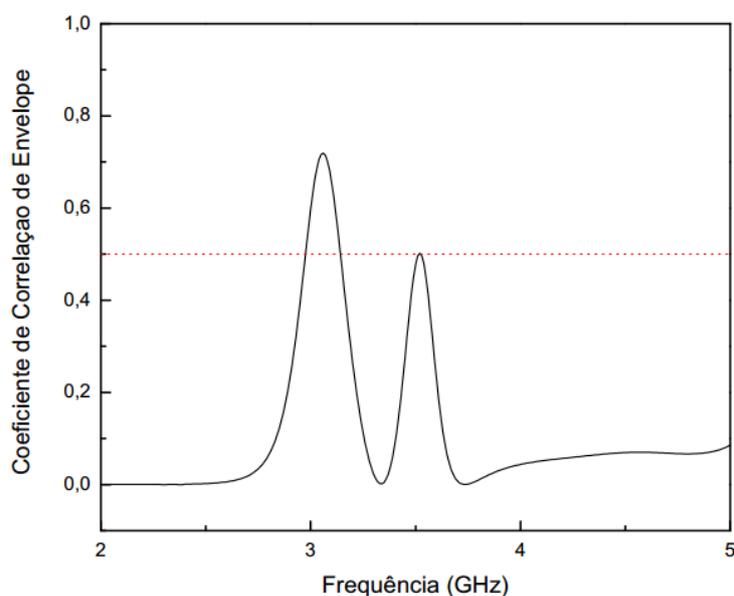


Fonte: Autora própria.

A partir da Figura 42 pode-se observar que o sistema MIMO 2x2 apresenta uma radiação omnidirecional, como esperado. Seu ganho máximo foi de -5,12 dB, ganho relativamente baixo. Pode-se notar que com o acréscimo de elementos no sistema MIMO é mais propício a haver interferências no sistema, degradando sua geometria e magnitude de propagação.

O fator de correlação de envelope foi determinado para o sistema MIMO 2x2 para averiguar a isolação entre cada elemento de antena. A Figura 43 mostra o CCE do sistema MIMO 2x2.

Figura 43 - Coeficiente de correlação de envelope do sistema MIMO 2x2.

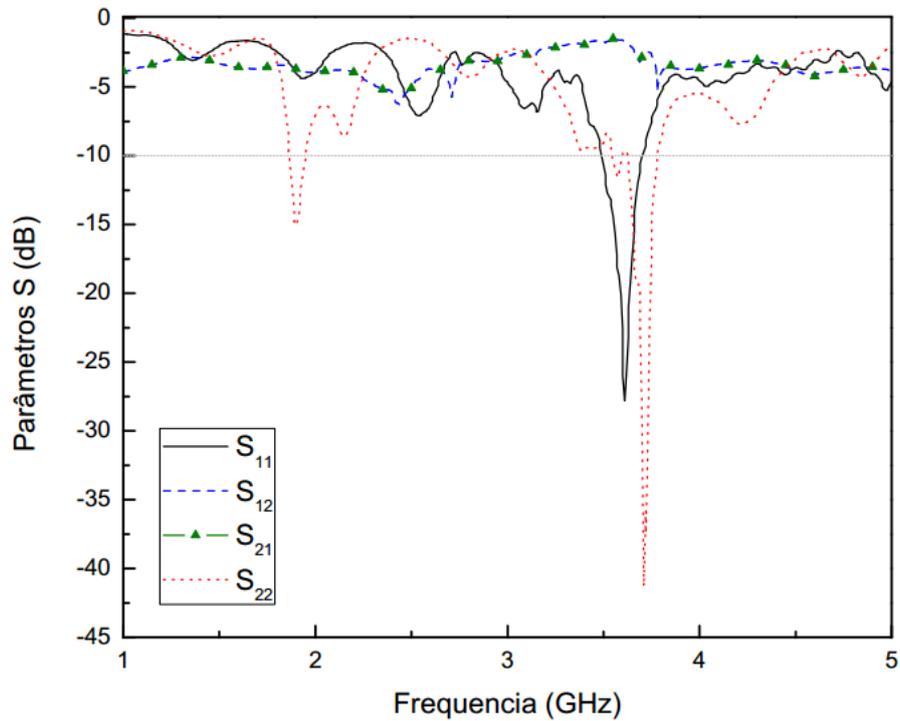


Fonte: Autora própria.

O CCE do sistema MIMO 2x2 mostrado na Figura 43 mostra que para valores de frequência entre 3,14 GHz e 3,5 GHz, apresentam coeficientes de correlação de envelope abaixo de 0,5, indicando que possuem uma isolamento satisfatória entre seus elementos para essa aplicação.

A Figura 44 mostra os parâmetros S para o sistema MIMO massivo 64x64 medidos entre os elementos (5,5) e (8,8).

Figura 44 - Parâmetros S medidos dos elementos (5,5) e (8,8) do sistema MIMO massivo 64x64.



Fonte: Autora própria.

Tabela 5 - Coeficientes de reflexão S_{11} e S_{22} dos elementos (5,5) e (8,8) do sistema MIMO massivo 64x64 medido.

Modo	Frequencia (GHz)	Coeficiente de reflexão (dB)	BW (Mhz)	BW (%)
S_{11}				
1	3,61 (3,49 – 3,7)	-27,8	210	5,8
S_{22}				
1	3,57 (3,54 – 3,6)	-11,6	60	1,68
2	3,71 (3,63 – 3,78)	-41,3	150	4,04

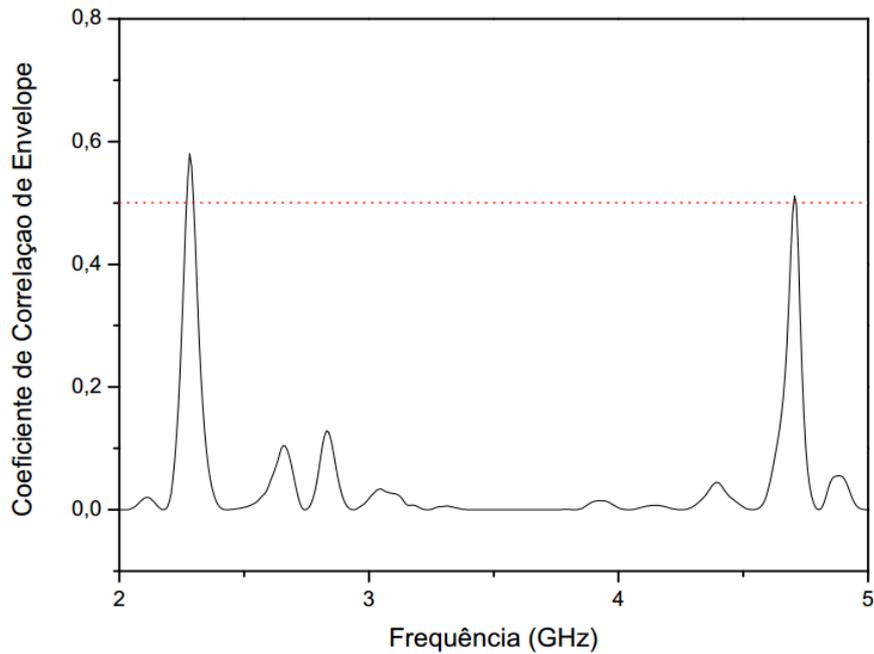
Fonte: Autora própria.

A partir da Figura 44 e da Tabela 5 pode-se observar que os elementos (5,5) e (8,8) do sistema MIMO massivo 64x64 estão operando dentro da frequência pela qual foram projetados. Devido à grande dificuldade de simulação

desse sistema, não foi possível desenvolver os gráficos simulados para comparação.

O CCE dos elementos (5,5) e (8,8) do sistema MIMO massivo 64x64 é mostrado na Figura 45.

Figura 45 - Coeficiente de correlação de envelope dos elementos (5,5) e (8,8) do sistema MIMO Massivo 64x64.

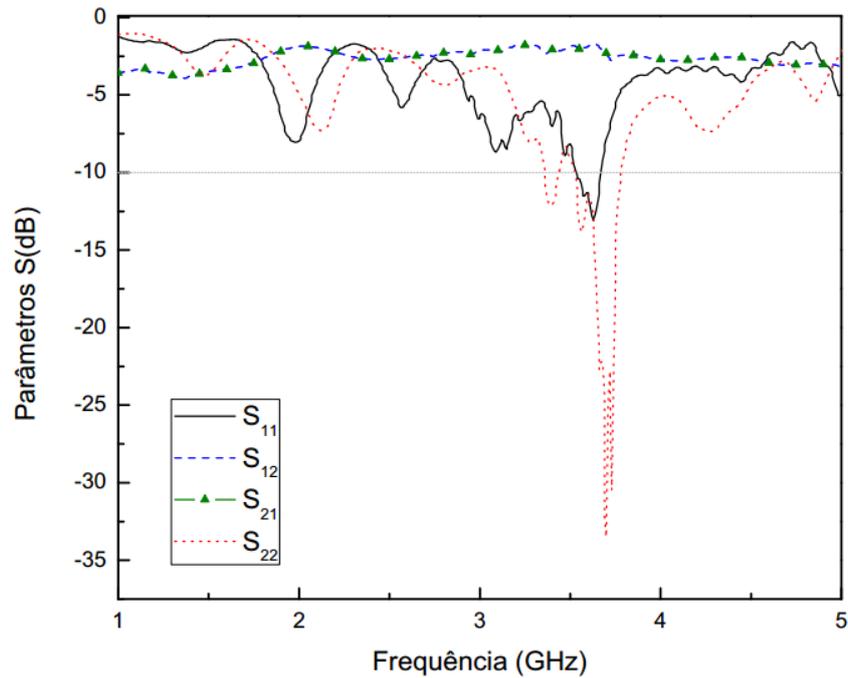


Fonte: Autora própria.

A partir da Figura 45 pode-se notar que a faixa de operação de 3 – 4 GHz apresentam valores de CCE abaixo de 0,5. Indicando que o sistema opera de maneira satisfatória e livre de interferências internas do sistema para aplicação na frequência de 3,5 GHz. As únicas faixas que apresentaram CCE superior a 0,5 entre 2 – 5 GHz foram 2,27 – 2,29 GHz e 4,7 – 4,71 GHz.

A Figura 46 mostra os parâmetros S dos elementos (5,5) e (6,6) do sistema MIMO.

Figura 46 - Parâmetros S medidos dos elementos (5,5) e (6,6) do sistema MIMO massivo 64x64.



Fonte: Autora própria.

Tabela 6 - Coeficientes de reflexão S11 e S22 dos elementos (5,5) e (6,6) do sistema MIMO massivo 64x64 medido.

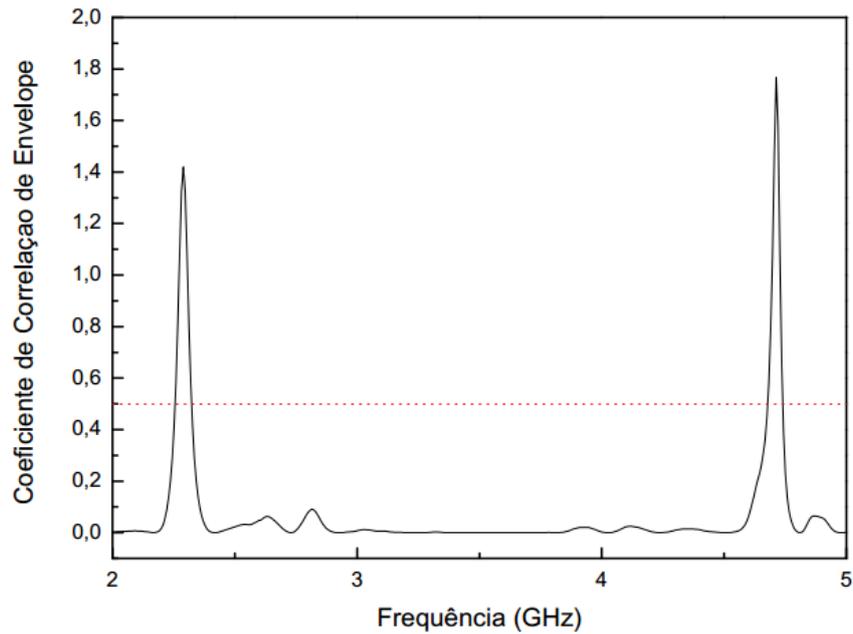
Modo	Frequencia (GHz)	Coeficiente de reflexão(dB)	BW (Mhz)	BW (%)
S11				
1	3,63 (3,53 – 3,67)	-13,1	140	3,85
S22				
1	3,39 (3,36 – 3,44)	-12,2	80	2,35
2	3,7 (3,53 – 3,78)	-33,5	250	6,75

Fonte: Autora própria.

A partir da Figura 46 e da Tabela 6 pode-se observar que os elementos (5,5) e (6,6) do sistema MIMO massivo 64x64 estão operando dentro da frequência pela qual foram projetados.

O CCE dos elementos (5,5) e (6,6) do sistema MIMO massivo 64x64 é mostrado na Figura 47.

Figura 47 - Coeficiente de correlação de envelope dos elementos (5,5) e (6,6) do sistema MIMO Massivo 64x64.

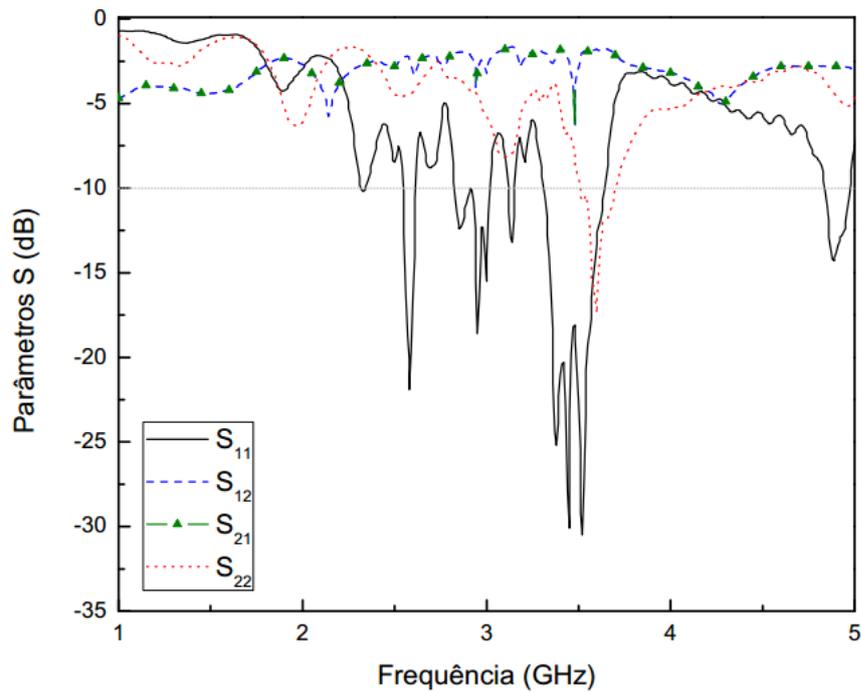


Fonte: Autora própria.

A partir da Figura 47 pode-se notar que a faixa de operação de 3 – 4 GHz se apresentam abaixo do valor de 0,5. Indicando que o sistema opera de maneira satisfatória e livre de interferências internas do sistema para aplicação na frequência de 3,5 GHz. As únicas faixas que apresentaram CCE superior a 0,5 entre 2 – 5 GHz foram 2,26 – 2,32 GHz e 4,68 – 4,73 GHz.

A mostra os parâmetros S dos elementos (6,6) e (8,8) do sistema MIMO.

Figura 48 - Parâmetros S medidos dos elementos (6,6) e (8,8) do sistema MIMO massivo 64x64.



Fonte: Autora própria.

Tabela 7 - Coeficientes de reflexão S11 e S22 dos elementos (6,6) e (8,8) do sistema MIMO massivo 64x64 medido.

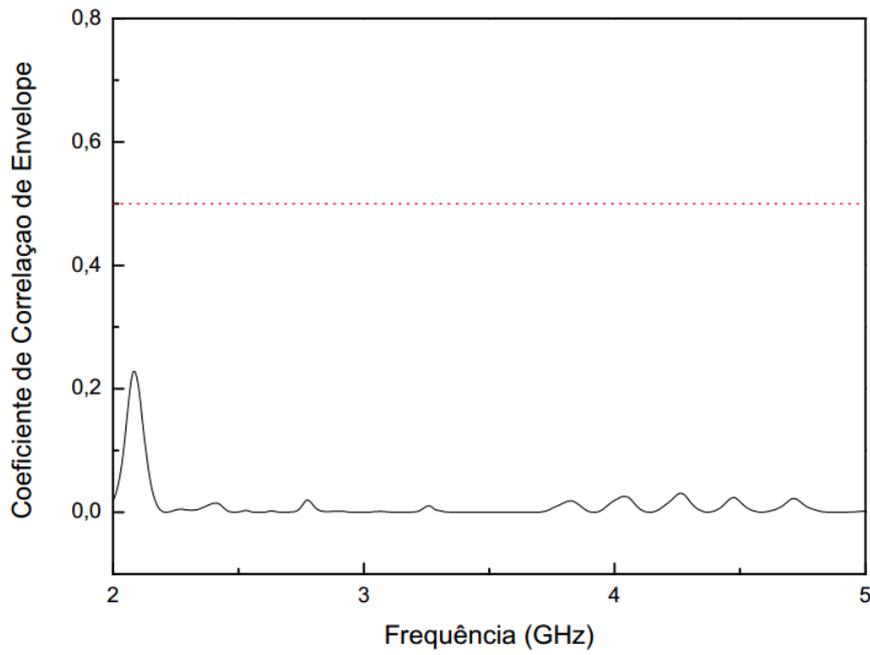
Modo	Frequencia (GHz)	Coeficiente de reflexão (dB)	BW (Mhz)	BW (%)
S11				
1	2,58 (2,55 – 2,61)	-21,9	60	2,32
2	2,95 (2,83 – 3,02)	-18,6	190	6,44
3	3,14 (3,13– 3,15)	-13,2	20	0,63
4	3,52 (3,31 – 3,64)	-30,5	330	9,37
5	4,89 (4,84 – 4,97)	-14,3	130	2,65
S22				
1	3,6 (3,51 – 3,7)	-17,4	190	5,27

Fonte: Autora própria.

A partir da Figura 48 e da Tabela 7 pode-se observar que os elementos (6,6) e (8,8) do sistema MIMO massivo 64x64 estão operando dentro da frequência pela qual foram projetados.

O CCE dos elementos (6,6) e (8,8) do sistema MIMO massivo 64x64 é mostrado na Figura 49

Figura 49 - Coeficiente de correlação de envelope dos elementos (6,6) e (8,8) do sistema MIMO Massivo 64x64.



Fonte: Autora própria.

A partir da Figura 49 pode-se notar que a faixa de operação de 2 – 5 GHz se apresentam abaixo do valor de 0,5. Indicando que o sistema opera de maneira satisfatória e livre de interferências internas do sistema para aplicação na frequência de 3,5 GHz.

Portanto, como o CCE dos elementos medidos entre as antenas (5,5), (6,6) e (8,8) apresentaram valores abaixo de 0,5 em 3,5 GHz, pode-se admitir que todos os outros elementos do sistema não apresentam interferência significativa na mesma faixa de frequência.

5. CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou um estudo de um sistema MIMO Massivo 64x64 para aplicação em tecnologia 5G na faixa de frequência de 3,5GHz, faixa de frequência essa pré-estabelecida para futura implantação na América do Sul; bem como a influência da variação do número de elementos de um sistema MIMO. Foram feitas simulações e medições para averiguar a operacionalidade do elemento de antena que compõe o sistema MIMO, funcionamento do sistema MIMO feito através do sistema MIMO 2x2 e, posteriormente, o sistema MIMO Massivo 64x64. Os resultados obtidos por meio das medições mostram que eles apresentam comportamentos similares quando se comparado aos resultados obtidos nas simulações, podendo afirmar assim, que a construção e suas respectivas medições apresentaram resultados satisfatórios.

Através da análise e realizada foi possível notar que apesar do CCE ter resultado em um valor baixo, sendo considerado um coeficiente muito bom, abaixo de 0,5, os sistemas MIMO 2x2, 4x4 e 8x8 simulados apresentaram diferentes coeficientes de reflexão, podendo concluir assim que as antenas ainda apresentaram um pouco de interferência entre elas, porém de forma sutil. As formas dos diagramas de radiação mostraram que tiveram variações entre cada tipo de sistema MIMO, em forma e magnitude, porém todas elas apresentaram um diagrama omnidirecional.

O sistema MIMO Massivo 64x64 apresentou praticamente o mesmo desempenho para as antenas medidas, pois todas operaram na faixa de frequência pela qual foram projetadas. As medições foram feitas de forma estratégica, o elemento do centro foi medido com os elementos de sua vizinhança e depois foi medido com os elementos da extremidade. Como os elementos medidos entre sua vizinhança e os da extremidade apresentaram dados satisfatórios, e não tiveram interferências significativas entre si, pode-se concluir que todos os elementos que estão entre os do centro e os da extremidade não irão apresentar interferência também. Isso mostra que o sistema MIMO Massivo apresentou um desempenho competente, apesar do número muito elevado de antenas compactadas em um substrato relativamente pequeno.

5.1. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Algumas sugestões para trabalhos futuros serão apresentadas tomando como base os resultados obtidos por esse trabalho:

- Fazer um estudo sobre a interferência do CCE de um sistema MIMO e identificar qual a distância ideal entre elas em relação ao comprimento de onda da antena, que resultaria em uma interferência desprezível;
- Fazer um estudo sobre desempenho e interferência entre as antenas MIMO ao passo que se aumentam o número de antenas no sistema;
- Fazer uma medição utilizando um analisador de redes para obter a densidade de sinal enviado por um sistema MIMO Massivo e sua comparação com um elemento de antena.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

3GPP. -IETF Dependencies are included in the 3GPP Work Plan. 2011. Disponível em: <<http://www.3gpp.org/ftp/Information/IETF-Dependencies/>>. Acesso em: 15 jan. 2019.

ALAMOUTI, S.m.. A simple transmit diversity technique for wireless communications. **Ieee Journal On Selected Areas In Communications**, [s.l.], v. 16, n. 8, p.1451-1458, 1998. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/49.730453>.

Ansoft. ANSYS HFSS 19.0. online: www.ansoft.com.

BARTLETT, Forrest. “**A dual diversity preselector**” QST, vol. XXV, pp. 37–39, Apr. 1941.

BALANIS, Constantine A.. **Antenna Theory: Analysis and Design.** 4. ed. New Jersey: Wiley & Sons, 2016. 1095 p.

BEVERAGE, H.h.; PETERSON, H.o.. Diversity Receiving System of R.C.A. Communications, Inc., for Radiotelegraphy. **Proceedings Of The Ire**, [s.l.], v. 19, n. 4, p.529-561, abr. 1931. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/jrproc.1931.222362>.

BIGLIERI, Ezio et al. **MIMO Wireless Communication.** Cambridge: Cambridge University Press, 2007. 323 p.

BLANCH, S.; ROMEU, J.; CORBELLA, I.. **Exact representation of antenna system diversity performance from input parameter description.** **Electronics Letters**, [s.l.], v. 39, n. 9, p.705-707, 2003. Institution of Engineering and Technology (IET). <http://dx.doi.org/10.1049/el:20030495>.

BRENNAN, D.. Linear Diversity Combining Techniques. **Proceedings Of The Ire**, [s.l.], v. 47, n. 6, p.1075-1102, jun. 1959. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/jrproc.1959.287136>.

CARUGI, Marco. **Key features and requirements of 5G/IMT-2020 networks.** Disponível em: <<https://www.itu.int/en/ITU-D/Regional->

Presence/ArabStates/Documents/events/2018/RDF/Workshop%20Presentations/Session1/5G-%20IMT2020-presentation-Marco-Carugi-final-reduced.pdf>.

Acesso em: 02 nov. 2019.

E. V. Byron, “**A new flush-mounted antenna element for phase array application**”, in proc. Phased – Array Antenna Symp., 1970, pp.187-192.

FOUDAZI Ali., MALLAHZADEH Alireza., e NEZHAD, Sajad Mohammad, “**A triple-band WLAN/WiMAX printed monopole antenna for MIMO applications.**” Microwave And Optical Technology Letters, vol. 54, pp. 1321-1325. Maio, 2012.

FOSCHINI, Gerard J.. Layered space-time architecture for wireless communication in a fading environment when using multi-element antennas. **Bell Labs Technical Journal**, [s.l.], v. 1, n. 2, p.41-59, 14 ago. 2002. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1002/bltj.2015>.

FUSCO, Vicent F.. **Foundations of Antenna Theory and Techniques**. India: Pearson, 2007.

G. A. Deschamps, “**Microstrip Microwave antennas**”, presented at third USAF symp.on Antennas, 1953.

HOFFMAN, Paul. **A Tao of IETF: A Novice’s Guide to the Internet Engineering Task Force**. Disponível em: <<https://www.ietf.org/tao.html>>. Acesso em: 15 jan. 2019.

IEEE. **802 5G/IMT-2020 Standing Committee**. Disponível em: <<https://futurenetworks.ieee.org/tech-focus/june-2017/standards-for-5g-and-beyond>>. Acesso em: 14 jan. 2019.

IEEE **802 LMSC Overview & Guide [Online]**. Available: <http://www.ieee802.org/IEEE-802-LMSC-OverviewGuide-06-Oct-2016-v2.pdf>

IEEE. **IEEE 802 LMSC Overview & Guide [Online]**. 2016. Disponível em: <<http://www.ieee802.org/IEEE-802-LMSC-OverviewGuide-06-Oct-2016-v2.pdf>>. Acesso em: 10 jan. 2019.

JENSEN, M.a.; WALLACE, J.w.. A Review of Antennas and Propagation for MIMO Wireless Communications. **IEEE Transactions On Antennas And Propagation**, [s.l.], v. 52, n. 11, p.2810-2824, nov. 2004. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/tap.2004.835272>.

JENSEN, Michael A.. A history of MIMO wireless communications. **2016 IEEE International Symposium On Antennas And Propagation (apsursi)**, [s.l.], p.681-682, jun. 2016. IEEE. <http://dx.doi.org/10.1109/aps.2016.7696049>.

LI, Yixin et al. **12-Port 5G Massive MIMO Antenna Array in Sub-6GHz Mobile Handset for LTE Bands 42/43/46 Applications**. *IEEE Access*, [s.l.], v. 6, p.344-354, 16 out. 2017. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/access.2017.2763161>.

MORAIS, José Haroldo Cavalcante de. **Estudos de Antenas Patches de Microfita Miniaturizadas em Banda Larga para Aplicação em dispositivos móveis e portáteis**. 2011. 75 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2011.

NEZHAD, Sajad Mohammad Ali; HASSANI, Hamid Reza. A Novel Triband E-Shaped Printed Monopole Antenna for MIMO Application. **IEEE Antennas And Wireless Propagation Letters**, [s.l.], v. 9, p.576-579, 2010. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/lawp.2010.2051131>.

NIKOLICH, Paul et al. **Standards for 5G and Beyond: Their Use Cases and Applications**. 2017. Disponível em: <<https://futurenetworks.ieee.org/tech-focus/june-2017/standards-for-5g-and-beyond>>. Acesso em: 19 jan. 2019.

NILSSON, James W.; RIEDEL, Susan A.. **Circuitos elétricos**. 8. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2009. 564 p.

OLIVEIRA, Elder Eldervitch Carneiro de. **Antenas de Microfita com Patch QuaseFractal para Aplicações em Redes WPAN/WLAN**. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Centro de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e da Computação, Natal, Dezembro de 2008.

Q. H. Spencer, B. D. Jeffs, M. A. Jensen, and A. L. Swindlehurst, “**Modeling the statistical time and angle of arrival characteristics of an indoor multipath channel**”, IEEE J. Selected Areas Commun., vol. 18, pp. 347–360, Mar. 2000.

RALEIGH, G.g.; CIOFFI, J.m.. Spatio-temporal coding for wireless communication. **IEEE Transactions On Communications**, [s.l.], v. 46, n. 3, p.357-366, mar. 1998. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/26.662641>.

RAMESH, M., YIP, K. B. **Design Inset-Feed Microstrip Patch Antennas**. 2003. Disponível em: <<http://mwrf.com/components/design-inset-fed-microstrip-patch-antennas>>. Acesso em 30/08/2018.

SARAEREH, Omer Al. **Monopole Antenna: Analysis, Design and Simulation using Computer**. Kingdom Of Jordan: Department Of Electrical And Computer Engineering, 2007.

ZHAO, Long et al. **Massive MIMO in 5G Networks: Selected Applications**. China: Springer, 2018.

ZHANG, Shuai et al. Reduction of the Envelope Correlation Coefficient With Improved Total Efficiency for Mobile LTE MIMO Antenna Arrays: Mutual Scattering Mode. **IEEE Transactions On Antennas And Propagation**, [s.l.], v. 61, n. 6, p.3280-3291, jun. 2013. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE).