

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA

ENGENHARIA ELETRÔNICA E DE TELECOMUNICAÇÕES

CAMPUS PATOS DE MINAS

CARLOS AUGUSTO MATIAS

**REDE DE ANTENAS IMPRESSAS FAIXA LARGA COM
DIAGRAMA DE IRRADIAÇÃO RECONFIGURÁVEL PARA
APLICAÇÕES EM 5G**

Patos de Minas - MG

2022

CARLOS AUGUSTO MATIAS

**REDE DE ANTENAS IMPRESSAS FAIXA LARGA COM
DIAGRAMA DE IRRADIAÇÃO RECONFIGURÁVEL PARA
APLICAÇÕES EM 5G**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à banca examinadora como requisito para graduação em Engenharia Eletrônica e de Telecomunicações, da Faculdade de Engenharia Elétrica, da Universidade Federal de Uberlândia, Campus Patos de Minas.

Orientador: Prof. Dr. Renan Alves dos Santos

Patos de Minas - MG

2022

CARLOS AUGUSTO MATIAS

**REDE DE ANTENAS IMPRESSAS FAIXA LARGA COM DIAGRAMA DE
IRRADIAÇÃO RECONFIGURÁVEL PARA APLICAÇÕES EM 5G**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à banca examinadora como requisito para graduação em Engenharia Eletrônica e de Telecomunicações, da Faculdade de Engenharia Elétrica, da Universidade Federal de Uberlândia, Campus Patos de Minas.

Patos de Minas, 18/11/2022

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Renan Alves dos Santos (FEELT/UFU)
Orientador

Prof. Dr. Daniel Costa Ramos (FEELT/UFU)

Prof^ª. Dra. Karine Barbosa Carbonaro (FEELT/UFU)

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar meus agradecimentos, a Deus por toda força, ânimo e coragem, os quais me permitiram trilhar esta caminhada.

Agradeço ao meu pai (in memoriam), que sempre me incentivou a estudar, para pudesse ter melhores oportunidades na vida.

Agradeço a minha mãe que desde o início me apoiou, incentivou, e me ajudou incondicionalmente ao longo desta jornada.

Agradeço a todos os meus familiares que participaram dessa minha caminhada, e me apoiaram.

Agradeço, ao meu orientador professor Dr. Renan, por toda orientação, dedicação e incentivo na realização deste trabalho.

Agradeço a banca examinadora, por terem aceitado o convite e por ajudarem a engrandecer este trabalho.

Agradeço aos amigos e colegas que conheci na UFU e convivi durante a graduação.

Agradeço também a todos os professores, que durante minha graduação me passaram não só conhecimento, mas ensinamentos que levarei para toda minha vida.

Por fim agradeço a Universidade Federal de Uberlândia – Campus Patos de Minas, pelo ensino de excelente qualidade.

A todos, meu muito obrigado!

RESUMO

Este trabalho de conclusão de curso tem como proposta o projeto numérico de uma rede de antenas impressas faixa larga com diagrama de irradiação reconfigurável para operação em redes celulares de quinta geração (5G) na faixa de frequência de 3,5 GHz. Nesse sentido, tem-se como elemento base para a construção da rede uma antena de microfita retangular modificada, podendo assim operar a faixa de frequência 3,3 GHz à 3,8 GHz, padronizada pela Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL) como uma das bandas práticas para o 5G no Brasil. A rede foi desenvolvida aplicando os conceitos de redes lineares de antenas, de modo que a variação da posição onde se observa a máxima irradiação é controlada pela diferença de fase das correntes que excitam cada antena. Todas as simulações do trabalho foram realizadas por meio do programa comercial Ansys Electronics Desktop, a partir do módulo de simulação HFSS (*High-Frequency Structure Simulator*). Após análise das simulações dos projetos de antenas deste trabalho, foi demonstrado que a rede de antenas linearmente uniforme proposta aqui apresenta as características necessárias e pode ser aplicada nas redes 5G.

Palavras-chave: Antenas, Banda Ultra-Larga, Diagrama de Irradiação Reconfigurável, 5G.

ABSTRACT

This course completion work proposes the numerical design of a broadband printed antenna network with a reconfigurable irradiation diagram for operation in fifth generation cellular networks (5G) in the 3.5 GHz frequency band. In this sense, the basic element for building the network is a modified rectangular microstrip antenna, thus being able to operate in the 3.3 GHz to 3.8 GHz frequency band, standardized by the National Telecommunications Agency (ANATEL) as one of the practical bands for 5G in Brazil. The network was developed applying the concepts of linear antenna networks, so that the variation of the position where the maximum irradiation is observed is controlled by the phase difference of the currents that excite each antenna. All work simulations were carried out using the commercial program Ansys Electronics Desktop, from the HFSS (High-Frequency Structure Simulator) simulation module. After analyzing the simulations of the antenna designs in this work, it was demonstrated that the linearly uniform antenna network proposed here has the necessary characteristics and can be applied in 5G networks.

Keywords: Antennas, Ultra-Wide Band, Radiation Pattern Reconfigurable, 5G.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Comparação entre cobertura móvel convencional e com <i>beamforming</i>	16
Figura 2.1 - Antena de microfita retangular.	22
Figura 2.2 - Tipos de alimentação de antenas de microfita.	24
Figura 2.3 - Antena de microfita retangular por representada por duas fendas irradiantes.....	25
Figura 2.4 - Exemplo da variação do ponto de alimentação para modificar a impedância de entrada da antena de microfita retangular.....	26
Figura 2.5 - Técnica de modificação em uma antena de microfita para criar uma antena impressa faixa larga.....	29
Figura 2.6 - Rede linear uniforme de antenas.	30
Figura 2.7 - Rede de antenas impressas faixa larga com diagrama de irradiação reconfigurável.	31
Figura 4.1 – Descrição das variáveis do modelo numérico da antena de microfita retangular.	35
Figura 4.2 - Resposta em frequência dos parâmetros de impedância da antena de microfita.	36
Figura 4.3 - Comportamento do diagrama de irradiação de ganho da antena de microfita retangular na frequência de 3,5GHz.....	36
Figura 4.4 – Ilustração do estudo da redução do plano terra da antena de microfita retangular.	37
Figura 4.5 - Comportamento da impedância de entrada da antena com a redução do comprimento do plano terra.....	38
Figura 4.6 - Comportamento do coeficiente de reflexão da antena com a redução do comprimento do plano terra.....	39
Figura 4.7 - Comportamento do diagrama de irradiação de ganho da antena com o plano de terra truncado na frequência de 3,5GHz.	40
Figura 4.8 - Ilustração do estudo do arredondamento dos vértices inferiores da antena com o plano de terra truncado.	41
Figura 4.9 - Ilustração do comportamento da densidade superficial de corrente com o arredondamento dos vértices inferiores da antena com o plano de terra truncado.....	41
Figura 4.10 - Comportamento da impedância de entrada da antena ao estudar o arredondamento dos vértices inferiores da antena com o plano terra truncado.	42
Figura 4.11 - Comportamento do coeficiente de reflexão da antena ao estudar a redução do comprimento do plano terra.	42
Figura 4.12 - Comportamento do diagrama de irradiação de ganho da antena para $n = 0,6$	43
Figura 4.13 - Configurações da rede linear uniforme de antenas impressas faixa larga.	43
Figura 4.14 - Comportamento do coeficiente de reflexão da rede linear uniforme de antenas impressas faixa larga com dois elementos.	44

Figura 4.15 - Comportamento do diagrama de irradiação de ganho em 3D da rede linear uniforme de antenas impressas faixa larga com dois elementos.	45
Figura 4.16 - Comportamento do coeficiente de reflexão da rede linear uniforme de antenas impressas faixa larga com quatro elementos.....	46
Figura 4.17 - Comportamento do diagrama de irradiação de ganho em 3D da rede linear uniforme de antenas impressas faixa larga com quatro elementos.	47

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

3G	Terceira geração de redes móveis
4G	Quarta geração de redes móveis
5G	Quinta geração de redes móveis
3GPP	Projeto de Parceria de 3ª Geração
CAGR	<i>Compound Annual Growth Rate</i>
eMBB	<i>enhanced Mobile Broadband</i>
FEM	Método de Elementos Finitos
Gbits/s	Gigabits por Segundo
HFSS	<i>High Frequency Structure Simulator</i>
IOE	<i>Internet of Everything</i>
IOT	<i>Internet of Things</i>
LTE	<i>Long Term Evolution</i>
MIMO	Múltiplas Entradas Múltiplas Saídas
mMTC	<i>Massive Machine Type Communications</i>
ms	Milissegundos
uRLLC	<i>Ultra-Reliable and Low-latency Communications</i>
WIFI	<i>Wireless fidelity</i>
C	Capacidade de um canal de transmissão
Bw	Largura de banda
S	Intensidade do sinal
N	Intensidade do ruído
Gbits/s	Gigabits por segundo
ms	Milissegundos
γ	Ângulo que aponta a direção de máxima irradiação em relação ao eixo do REDE
δ	Defasagem temporal na alimentação de cada antena
λ	Comprimento de onda
π	Constante pi
ϵ_r	Permissividade elétrica do material

h	Altura
W	Largura
L	Comprimento
f_r	Frequência de ressonância ou de operação
ΔL	Fator de correção para um efeito indesejável
Z_0	Impedância característica de uma linha de transmissão impressa
w_ℓ	Largura da fita condutora
Y	Admitância
G	Condutância
B	Susceptância
TM_{10}	Modo fundamental
Q	Fator de mérito (Fator de qualidade)
$VSWR_{m\acute{a}x}$	<i>Voltage Standing Wave Ratio Maximum</i>
Q_{rad}	Fator de mérito devido as perdas por irradiação
Q_{sur}	Fator de mérito devido as perdas por ondas de superfície
Q_c	Fator de mérito devido as perdas nos condutores
Q_d	Fator de mérito devido potência dissipada pelo aquecimento (efeito Joule) em laminados dielétricos

SUMÁRIO

CONCEITOS INTRODUTÓRIOS	13
1.1 INTRODUÇÃO	13
1.2 PROBLEMATIZAÇÃO	14
1.3 TEMA DO PROJETO	18
1.4 OBJETIVOS	18
1.4.1 OBJETIVOS GERAIS	18
1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	19
1.5 JUSTIFICATIVAS	19
1.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	20
REFERENCIAL TEÓRICO	21
2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	21
2.2 ANTENA DE MICROFITA RETANGULAR FAIXA LARGA.....	21
2.2.1 ANTENAS DE MICROFITA RETANGULAR.....	21
2.2.2 ANTENA IMPRESSA COM BANDA LARGA.....	27
2.3 REDE DE ANTENAS FAIXA LARGA COM DIAGRAMA DE IRRADIAÇÃO RECONFIGURÁVEL	29
2.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS	31
MATERIAIS E MÉTODOS.....	32
3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	32
3.2 METODOLOGIA DE DESENVOLVIMENTO	32
3.3 RECURSOS NECESSÁRIOS	33
3.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS	33
RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	34
4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	34
4.2 PROJETO DA ANTENA DE MICROFITA RETANGULAR.....	34
4.3 PROJETO DA ANTENA IMPRESSA FAIXA LARGA.....	37

4.3.1	Redução do plano terra	37
4.3.2	Arredondamento dos vértices	40
4.4	PROJETO DA REDE LINEAR UNIFORME.....	43
4.4.1	Rede com dois elementos	44
4.4.2	Rede com quatro elementos.....	46
4.5	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	48
4.6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	48
CONCLUSÃO, CONTRIBUIÇÃO E TRABALHOS FUTUROS.....		49
5.1	CONCLUSÕES	49
5.2	PROPOSTAS PARA A CONTINUAÇÃO DO TRABALHO	50

CAPÍTULO 1

CONCEITOS INTRODUTÓRIOS

Neste capítulo são apresentadas as principais motivações, bem como os objetivos a serem alcançados com este trabalho.

1.1 INTRODUÇÃO

O 5G está em estágio de desenvolvido, sendo aprimorado por pesquisas e desenvolvimento de diversas partes de mundo, com o objetivo de prover conectividade nunca antes vista, conectando tudo e todos em qualquer lugar [1]. Por esse motivo, tem-se padrões estipulados que servem como base para o desenvolvimento, proposto por agências como o 3GPP (*3rd Generation Partnership Project*) [2] e ITU (*International Telecommunication Union*) [3].

No final do ano de 2017, o 3GPP apresentou o primeiro conjunto de especificações sobre o 5G, descrevendo a tecnologia [4]. Após tal entrega, em 2018 o 3GPP *Release 15* [5], foi o primeiro conjunto completo de padrões 5G. Enquanto as especificações iniciais apresentadas em 2017 permitiram sistemas de rádio 5G não autônomos integrados em redes LTE de geração anterior (4G), o *Release 15* apresenta os padrões para cobertura 5G ‘autônoma’, com um novo sistema de rádio, o 5G NR (*New Radio*).

A segunda fase da padronização do 5G NR pelo 3GPP foi apresentada no *Release 16*, que após grande discussão foi apresentada em versão final no ano de 2020 [6]. A *Release 16* é uma versão importante da padronização do 5G NR, principalmente porque seus conceitos foram submetidos a ITU para a criação e delegação de padrões para as sociedades internacionais de telecomunicações, o que ficou conhecido como o documento IMT-2020 [7].

Atualmente, com previsão de conclusão para 2022, está em desenvolvimento o *Release 17* de padronização do 5G NR [8]. Além disso, já há estudos em andamento para o *Release 18* NR [9]. Com isso, nota-se que apesar de muitos conceitos já estarem claros, ainda há muito por ser definido e estudado até a consolidação final das redes celulares 5G.

Nos *Releases 15 e 16*, o 3GPP definiu três cenários de aplicações para o 5G NR [10]: alta vazão de dados para os dispositivos móveis (eMBB - *Enhanced Mobile Broadband*), comunicação de baixa latência e ultra confiável (URLLC - *Ultra Reliable Low Latency*) e comunicação massiva entre máquinas (mMTC - *massive Machine Type Communication*). Além desses três cenários, alguns países (juntamente com o Brasil) apresentaram estudos que culminaram em um quarto cenário para acesso de longo alcance em áreas remotas (eRAC - *enhanced Remote Area Communications*) [11].

Em resumo, os quatro cenários citados para o 5G NR, podem ser explicados como:

A eMBB apresenta o conceito de serviços de altas taxa de dados, como por exemplo aplicações com transmissões de vídeos de alta definição, imagens 4K, jogos virtuais, realidade aumentada.

A mMTC apresenta o conceito de serviços em que se tem grande número de dispositivos conectados à rede, em aplicações como Internet das Coisas (IoT - *Internet of Things*) e cidades inteligentes (*Smart cities*).

A URLLC apresenta o conceito de serviços que requerem baixa latência e ultra confiabilidade na comunicação, por exemplo aplicações como cirurgias remotas e automatização na indústria.

A eRAC apresenta o conceito de serviços em que se tenha qualidade de conexão em áreas remotas e rurais, destacando aplicações como automatização no campo.

Outra característica importante padronizada para o 5G NR são as faixas de frequência de operação. Basicamente, tem-se duas bandas que são subdivididas em faixas menores [12]: primeira faixa (FR1 - *Frequency Range 1*) de 410 MHz a 7125 MHz e a segunda (FR2 - *Frequency Range 2*) de 24,25 GHz à 52,60 GHz.

No cenário brasileiro, a ANATEL já padronizou as bandas de operação para o 5G NR e realizou o leilão que concedeu o direito de uso e consequente de implementação para operadoras. Mais especificamente falando de bandas, a ANATEL definiu duas subfaixas como sendo de 3,3 GHz à 3,8 GHz e 24,25 GHz à 27,25 GHz [13].

1.2 PROBLEMATIZAÇÃO

O 5G representará uma grande quebra de paradigmas no mundo das telecomunicações e trará muitos desafios em diversos setores da tecnologia [14]. Um dos grandes dilemas é propor

conceitos dentro da tecnologia que sejam capazes de suportar a grande demanda do tráfego de dados que as redes experimentaram.

Segundo a teoria da informação de Shannon, de onde se tem o conceito da capacidade de um canal de transmissão (C), tem-se que a máxima taxa de transmissão possível, é dada por [15]:

$$C = B_w \times \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right), \quad (1.1)$$

onde B_w é a largura de banda alocada para transmissão (dada em Hertz), S e N são, respectivamente, a intensidade do sinal e do ruído (dadas em Watts). Sendo assim, para aumentar o valor de C existem duas formas: trabalhar com bandas de transmissão maiores ou aumentar a relação sinal-ruído. Com isso, um dos dispositivos que podem ser cruciais para implementação do 5G NR são antenas, tendo à necessidade de se projetar estruturas com maior banda e/ou diretividade.

Tendo em vista a necessidade de antenas com características específicas, é possível encontrar na literatura inúmeros trabalhos sobre o tema. Com esse intuito, realizou-se um breve levantamento bibliográfico (a partir do ano de 2017 quando o 3GPP apresentou o *Release 15*), primeiramente sobre antenas com banda larga operando em 5G NR, dos quais se destacam os trabalhos:

Em 2017, J. Wang *et al.* apresentaram um trabalho sobre uma antena corneta setorial no plano do campo magnético construída em circuito impresso, capaz de operar em redes 5G de 25,80 GHz à 40,20 GHz (com uma banda aproximadamente 47%, admitindo valores de coeficiente de reflexão menores que -10dB) [16]. Nessa faixa de operação, o ganho da antena proposta ficou sempre maior que 9 dBi.

Em 2018, W. An *et al.* apresentaram um trabalho sobre uma antena de microfita modificada, capaz de operar em redes 5G de 2,84 GHz à 5,17 GHz (com uma banda aproximadamente 58%, admitindo valores de coeficiente de reflexão menores que -10 dB) [16]. Nessa faixa de operação, o ganho da antena proposta ficou sempre maior que 5 dBi.

Em 2019, Y. Li *et al.* apresentaram um trabalho sobre uma antena de microfita modificada, capaz de operar em redes 5G de 2,13 GHz à 3,90 GHz (com uma banda aproximadamente 22%, admitindo valores de coeficiente de reflexão menores que -10 dB) [17]. Nessa faixa de operação, o ganho da antena proposta ficou sempre maior que 8 dBi.

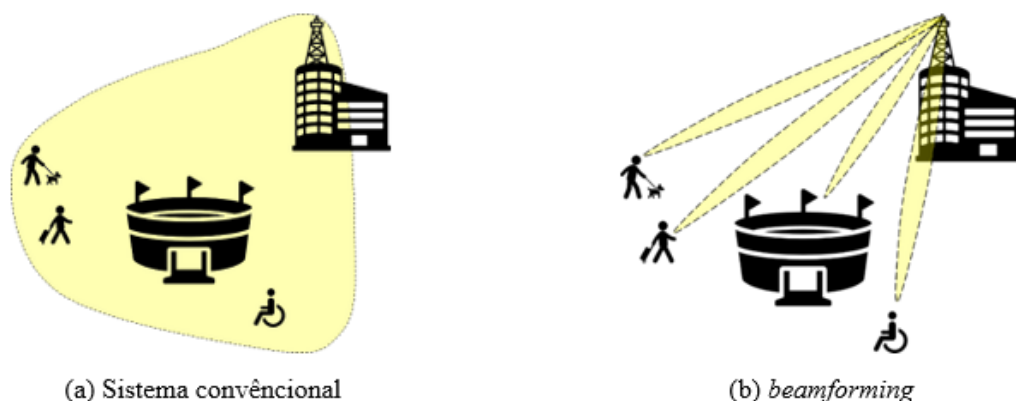
Em 2020, M. Ciydem *et al.* apresentaram um trabalho sobre uma antena de microfita modificada, capaz de operar em redes 5G de 3,30 GHz à 3,80 GHz (com uma banda aproximadamente 14%, admitindo valores de coeficiente de reflexão menores que -10 dB) [18]. Nessa faixa de operação, o ganho da antena proposta ficou sempre maior que 9 dBi.

Em 2021, X. T. Yuan *et al.* apresentaram um trabalho sobre uma antena de PIFA, capaz de operar em redes 5G de 3,30 GHz à 7,50 GHz (com uma banda aproximadamente 78%, admitindo valores de coeficiente de reflexão menores que -6 dB) [19]. Nessa faixa de operação, o ganho da antena proposta ficou sempre maior que 4 dBi.

Em 2022, K. L. Wong *et al.* apresentaram um trabalho sobre uma antena de microfita triangular modificada, capaz de operar em redes 5G de 3,30 GHz à 4,20 GHz (com uma banda aproximadamente 24%, admitindo valores de coeficiente de reflexão menores que -10 dB) [20]. Nessa faixa de operação, o ganho da antena proposta ficou sempre maior que 6 dBi.

Uma segunda característica específica para antenas aplicadas ao 5G NR é apresentar valores elevados de diretividade (e consequentemente ganho). Isso é importante para maximizar a relação sinal-ruído, permitindo assim o aumento das taxas de transmissão conforme a capacidade de canal de Shannon. Entretanto, nesse contexto, conforme apresentado na Figura 1.1, torna-se necessário a criação de um sistema que faça o guiamento do feixe irradiado (que no inglês recebe o nome de *beamforming*). Isso é necessário, pois, com antenas mais diretivas cobre-se áreas geográficas menores e, para cobrir os usuários em deslocamento, precisa-se prover a mudança inteligente das direções de irradiação.

Figura 1.1 - Comparação entre cobertura móvel convencional e com *beamforming*.



Fonte: Adaptado de [29].

Uma das soluções para se obter o *beamforming* é a partir de uma rede de antenas em que a direção da irradiação é controlada pela diferença de fase entre as correntes que excitam

cada elemento. Com esse intuito, realizou-se um breve levantamento bibliográfico (a partir do ano de 2017 quando o 3GPP apresentou o *Release 15*), sobre antenas para *beamforming* operando em 5G NR, dos quais se destacam os trabalhos:

Em 2017, S. X. Ta *et al.* apresentaram um trabalho sobre uma rede de antenas dipolos impressos, capaz de operar em redes 5G de 26,50 GHz à 38,20 GHz (com uma banda aproximadamente 36%, admitindo valores de coeficiente de reflexão menores que -10 dB) [21]. Nessa faixa de operação, o ganho da antena chegou até 13 dBi com capacidade de variação do feixe de até 75° .

Em 2018, P. I. Bantavis *et al.* apresentaram um trabalho sobre uma rede de antenas Vivaldi, capaz de operar em redes 5G de 2,00 GHz à 5,00 GHz (com uma banda aproximadamente 86%, admitindo valores de coeficiente de reflexão menores que -10 dB) [22]. Nessa faixa de operação, o ganho da antena chegou até 11 dBi com capacidade de variação do feixe de até 50° .

Em 2019, M. Ansari *et al.* apresentaram um trabalho sobre uma rede de antenas dipolo impressas, capaz de operar em redes 5G de 27,50 GHz à 28,50 GHz (com uma banda aproximadamente 4%, admitindo valores de coeficiente de reflexão menores que -10 dB) [23]. Nessa faixa de operação, o ganho da antena chegou até 12 dBi com capacidade de variação do feixe de até 40° .

Em 2020, R. Lu *et al.* apresentaram um trabalho sobre uma rede de antenas dipolo impressas, capaz de operar em redes 5G de 24,00 GHz à 27,00 GHz (com uma banda aproximadamente 11%, admitindo valores de coeficiente de reflexão menores que -10 dB) [24]. Nessa faixa de operação, o ganho da antena chegou até 9dBi com capacidade de variação do feixe de até 40° .

Em 2021, G. Yang *et al.* apresentaram um trabalho sobre uma rede de antenas de microfita retangulares modificadas, capaz de operar em redes 5G de 3,15 GHz à 4,16 GHz (com uma banda aproximadamente 37%, admitindo valores de coeficiente de reflexão menores que -10 dB) [25]. Nessa faixa de operação, o ganho da antena chegou até 20 dBi com capacidade de variação do feixe de até 70° .

Em 2022, G. Yang *et al.* apresentaram um trabalho sobre uma rede de antenas de antenas impressas miniaturizadas, capaz de operar em redes 5G de 27,00 GHz à 28,50 GHz (com uma banda aproximadamente 5%, admitindo valores de coeficiente de reflexão menores que -10 dB) e de 35,00 GHz à 39,00 GHz (com uma banda aproximadamente 11%, admitindo valores de coeficiente de reflexão menores que -10 dB) [25]. Nessa faixa de operação, o ganho da antena chegou até 13 dBi com capacidade de variação do feixe de até 30° .

1.3 TEMA DO PROJETO

Conforme apresentado na Problematização, pela quantidade e qualidade de trabalhos sobre antenas com banda larga e/ou capacidade de prover *beamforming* para aplicações em 5G NR, esse campo de estudo é de grande relevância para o momento atual das telecomunicações. Por esse motivo, a proposta deste trabalho de conclusão de curso é apresentar o projeto numérico de uma rede de antenas banda larga e com capacidade de prover *beamforming* para aplicações no 5G NR no contexto brasileiro, podendo assim contribuir para esse ramo de estudos.

1.4 OBJETIVOS

O objetivo principal deste trabalho foi projetar e analisar uma rede de antenas de microfita retangulares modificadas (para prover banda larga de operação) com diagrama de irradiação reconfigurável (para prover *beamforming*), propondo uma antena potencial para aplicações 5G NR no Brasil.

1.4.1 OBJETIVOS GERAIS

Os objetivos gerais desse trabalho estão ligados ao projeto numérico da rede de antenas proposto. Para tal, podem ser divididos em:

- Estudo das características esperadas para o 5G NR.
- Estudo do projeto de uma antena de microfita com banda ultra-larga.
- Estudo das redes de antenas e suas aplicações.
- Realização do projeto numérico de uma rede de antenas de microfita de faixa larga e com diagrama de irradiação reconfigurável no simulador *Ansys Electronics Desktop*.

1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos estão ligados as características específicas do projeto, bem com as etapas executadas. Como apresentado na problematização, existem inúmeros trabalhos sobre antenas com banda larga operando em subfaixas das bandas FR1 (410 MHz a 7125 MHz) e FR2 (24,25 GHz à 52,60 GHz). Entretanto, tendo em vista contribuir para o cenário brasileiro, o primeiro objetivo desse trabalho é propor uma antena banda larga que opere ao menos de 3,3 GHz à 3,8 GHz, atendo assim a primeira banda definida pela ANATEL [13]. Assim, tem-se como métrica obter uma antena com desempenho similar à proposta em [18], todavia usando um modelo diferente de antena, baseado no trabalho [26]. Existem também algumas possibilidades de projeto da rede, entretanto, esse trabalho tem como objetivo a criação de uma estrutura linear uniforme, similar a apresenta em [21]. Para tal, os objetivos específicos podem ser divididos no:

- Projeto de uma antena de microfita retangular para o operar na frequência central de 3,5 GHz.
- Projeto de uma antena de microfita retangular modificada para o operar em faixa larga com bada de ao menos 3,3 GHz à 3,8 GHz. Nessa etapa é apresentado o passo a passo da metodologia para o alargamento da banda dessa antena.
- Projeto de uma rede de antena de microfita retangulares modificadas para o operar em faixa larga com bada de ao menos 3,3 GHz à 3,8 GHz, na configuração linear uniforme.

1.5 JUSTIFICATIVAS

Com a nova tecnologia da rede móvel 5G, necessita-se de estudos de modo a melhorar, facilitar e reduzir os custos de sua implementação em todo o mundo. Como visto no subtópico 1.2, há uma variedade de pesquisas sobre antenas impressas aplicadas ao 5G.

Dentro desse contexto, uma das principais vantagens da utilização de uma rede de antenas para o 5G é a possibilidade de direcionar a energia irradiada para um determinado setor da área geográfica, otimizando o alcance é o desempenho da rede. Além disso, as antenas de microfita podem ser implementadas para a cobertura de grandes áreas geográficas, com a

possibilidade de serem montadas em diferentes posições devido a sua flexibilidade, assim aproveitando ao máximo o espaço disponível

Portanto, a utilização uma rede de antenas de microfita para tecnologias 5G pode trazer grandes benefícios às redes móveis, pois permite o direcionamento de sinais específicos para regiões específicas de uma área geográfica, otimizando o desempenho da rede e melhorando a experiência dos usuários.

Assim, com esse trabalho além de um projeto de antena com características potenciais ao uso do 5G NR no Brasil, e criada uma metodologia de projeto de antenas que possa ser reproduzida em outras faixas de frequência, podendo ainda ser aplicada à outras tecnologias.

1.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo apresentou-se os conceitos introdutórios, bem como as motivações de projetar e estudar redes de antenas de microfita modificadas que poderão ser aplicadas as futuras redes móveis de quinta geração. Em sequência, no Capítulo 2 é abordado conceitos teóricos necessários para o projeto dessas estruturas.

CAPÍTULO 2

REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo são apresentados os conceitos teóricos necessários para o desenvolvimento desse trabalho de conclusão de curso.

2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Tendo em vista que o objetivo principal desse trabalho é o projeto numérico de uma rede de antenas faixa larga com diagrama de irradiação reconfigurável, que deve ter aplicabilidade nas redes 5G, o projeto se divide no desenvolvimento de apenas um elemento (antena de microfita retangular modificada) e de uma rede linear uniforme. Por esse motivo, é apresentado os conceitos teóricos necessários de modo progressivo ao usado no desenvolvimento do projeto. Começando pela antenna de microfita retangular, posteriormente a aplicação de técnicas visando o aumento de banda da antenna de microfita retangular, assim criando uma antenna de microfita modificada. Por fim utiliza-se a antenna de microfita modificada para criação de uma rede uniforme linear.

2.2 ANTENA DE MICROFITA RETANGULAR FAIXA LARGA

O elemento de antenna usado no projeto da rede proposta nesse trabalho é uma antenna de microfita retangular modificada (para apresentar faixa larga de operação). Para tal, utilizou-se como referência principal o trabalho apresentado em [26]. Dessa forma, parte se dos conceitos de antenas de microfita retangulares, demonstrando na sequência as modificações necessárias para transformar essa estrutura em uma antenna impressa faixa larga.

2.2.1 ANTENAS DE MICROFITA RETANGULAR

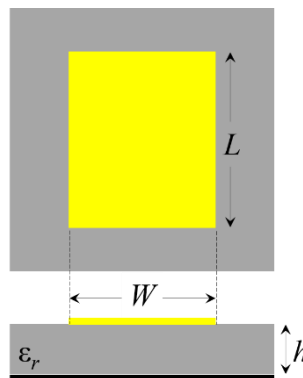
Uma antena é um dispositivo que trabalha convertendo a energia eletromagnética guiada (vinda de uma linha de alimentação) em energia eletromagnética irradiada, ou na recepção convertendo ondas eletromagnéticas em energia guiada [28]. Tal conceito é de extrema importância em sistemas de comunicação entre dois pontos distintos, por exemplo nas faixas de radiofrequência e micro-ondas.

Existem vários tipos de antenas, cada uma apresenta determinadas características que as tornam atrativas para certas finalidades. Por exemplo, pode-se destacar modelos como Yagi-Uda, Log-Periódica, Parabólicas, entre várias outras [28]. Todavia, um tipo de antena que vem ganhando cada vez mais relevância é a antena de microfita. Essa estrutura pode ser utilizada em diversas aplicações como, por exemplo, aplicações aeronáuticas, aplicações aeroespaciais, incluindo satélites e mísseis de alto desempenho. As antenas de microfita tem características como tamanho reduzido, baixo peso, custo de projeto relativamente baixo e facilidade de instalação em diversas estruturas devido a sua geometria compacta.

A antena de microfita retangular (ilustrada na Figura 2.1) é formada por dois elementos condutores metálicos, sendo o primeiro o elemento irradiador (na cor amarela) e o segundo o plano terra (na cor preta). O plano terra é uma superfície condutora, que é conectada ao fio terra do transmissor, o plano terra é utilizado com o intuito de refletir as ondas eletromagnéticas emitidas pelo elemento ressonador.

Os elementos metálicos são separados por um material dielétrico com permissividade elétrica do material ϵ_r e altura h (na cor cinza) [28]. Existem vários formatos para o elemento irradiador. Entretanto, o mais simples é o formato retangular. Nessa configuração, como mostrado na Figura 2.1, tem-se que determinar duas variáveis importantes de projeto: a largura W e o comprimento L do elemento ressonador.

Figura 2.1 - Antena de microfita retangular.



Fonte: O autor.

Para se obter um elemento irradiador eficiente (em termos do comportamento de diretividade e impedância de entrada), é aconselhável que W tenha valores próximos a meio comprimento de onda guiada [27]. Uma forma aproximada de se fazer isso é considerar o valor médio da constante dielétrica relativas do ar e do substrato no cálculo de modo que:

$$W = \frac{3 \times 10^8}{2f_r \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2}}}, \quad (2.1)$$

onde f_r é a frequência de ressonância ou de operação.

Para o modo fundamental de operação dessas antenas, o comprimento L é dado por [28]:

$$L = \frac{3 \times 10^8}{2f_r \sqrt{\epsilon_{ref}}} - 2\Delta L, \quad (2.2)$$

onde ϵ_{ref} é a constante dielétrica efetiva que, quando se atende a relação para $W > h$ (sempre será atendida se for feita a escolha correta do laminado dielétrico), pode ser calculada por:

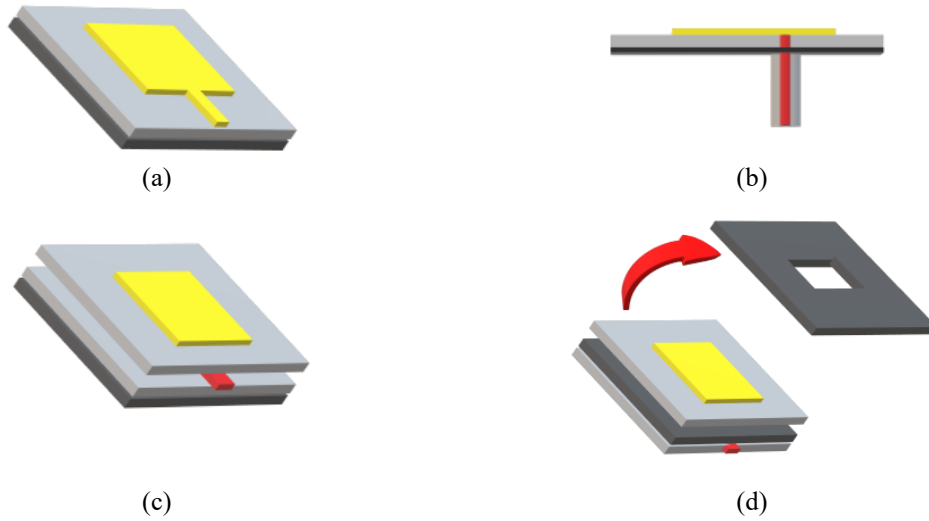
$$\epsilon_{ref} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \frac{1}{\sqrt{1 + 12 \frac{h}{W}}}, \quad (2.3)$$

e ΔL é um fator de correção para um efeito indesejável que leva ao aumento do comprimento elétrico do ressonador devido ao franjamento dos campos na borda do ressonador, dado por:

$$\Delta L = \frac{0,412h(\epsilon_{ref} + 0,3) \left(0,264 + \frac{W}{h}\right)}{(\epsilon_{ref} - 0,258) \left(0,8 + \frac{W}{h}\right)}, \quad (2.4)$$

Existe várias formas para a alimentação de antenas de microfita retangulares, em que as mais comuns são por uma linha de transmissão impressa (ver na Figura 2.2 (a)), sonda coaxial (ver na Figura 2.2 (b)), acoplamento por proximidade (ver na Figura 2.2 (c)) e acoplamento por abertura (ver na Figura 2.2 (d)). Nesse trabalho, seguindo os conceitos descritos na referência principal de estudo [26], foi utilizada a linha de transmissão impressa.

Figura 2.2 - Tipos de alimentação de antenas de microfita.



Fonte: O autor.

Existem diversas expressões que relacionam a impedância característica de uma linha de transmissão impressa (Z_o) com largura da fita condutora (w_ℓ) e com a espessura do laminado (h). Uma forma muito usual é dada (para $w_\ell > h$) [28]:

$$Z_o = \frac{120\pi}{\sqrt{\epsilon_{ref}} \left[\frac{w_\ell}{h} + 1,1393 + 0,667 \ln \left(\frac{w_\ell}{h} + 1,444 \right) \right]}, \quad (2.5)$$

Uma antena de microfita retangular pode ser representada por duas fendas irradiantes, separadas por uma linha de transmissão de microfita com baixa impedância e comprimento L (como na Figura 2.3). Cada fenda possui comprimento W e altura h , de modo que é possível determinar a impedância de cada uma dessas aberturas e fazer uma análise de circuito para encontrar a impedância de entrada da antena. Para simplificar o estudo, as duas fendas irradiante devem ser avaliadas em termos de uma admitância equivalente Y , dada por [28]:

$$Y = G + iB, \quad (2.6)$$

em que G descreve uma condutância e B uma susceptância. Como as fendas possuem as mesmas dimensões, pode-se escrever:

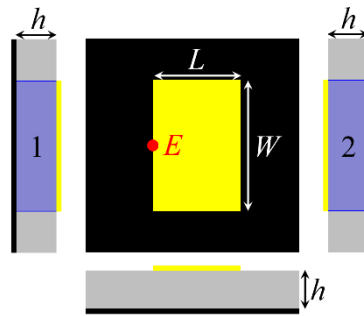
$$Y_1 = Y_2 \Rightarrow G_1 = G_2 \Rightarrow B_1 = B_2. \quad (2.7)$$

Os valores de G e B podem ser expressos por (atendendo a condição para $h < \lambda_0/10$) [28]:

$$G_1 = G_2 = \frac{W}{120\lambda_0} \left[1 - \frac{1}{24} (k_0 h)^2 \right] \quad (2.8)$$

$$B_1 = B_2 = \frac{W}{120\lambda_0} [1 - 0,636 \ln(k_0 h)]. \quad (2.9)$$

Figura 2.3 - Antena de microfita retangular representada por duas fendas irradiantes.



Fonte: O autor.

Para encontrar a admitância total de entrada da antena, no ponto E da Figura 2.3, é necessário somar Y_1 , situada em E , com o comportamento que Y_2 no mesmo ponto. Como a antena é vista como um trecho de linha de transmissão, pode-se fazer isto a partir do conceito de transformação de admitâncias de linhas de transmissão [28]. Para o modo fundamental, o comprimento L é aproximadamente meio comprimento de onda guiado no substrato. Dessa forma, em se tratando de admitância na linha, isso leva à uma defasagem de 180° na onda caminhante, que leva à mudança no sinal da parte imaginária de Y_2 ao observá-la em E , de modo que:

$$(Y_2)_E = G_2 - iB_2 = G_1 - iB_1. \quad (2.10)$$

Dessa forma, pode-se simplificar:

$$Y_E = Y_1 + (Y_2)_E = (G_1 + iB_1) + (G_1 - iB_1) = 2G_1 = \frac{W}{60\lambda_0} \left[1 - \frac{1}{24} (k_0 h)^2 \right]. \quad (2.11)$$

Então, como a impedância é determinada pelo inverso da admitância, pode-se escrever a impedância de entrada da antena de microfita retangular no ponto E como:

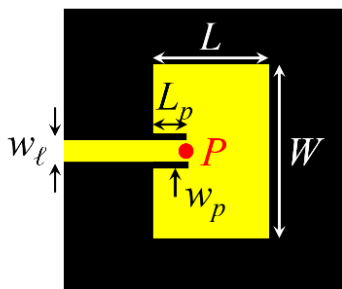
$$(Z_{en})_E = \frac{1}{Y_E} = \frac{1}{\frac{W}{60\lambda_0 \left[1 - \frac{1}{24}(k_0 h)^2\right]}} = \frac{60\lambda_0}{W \left[1 - \frac{1}{24}(k_0 h)^2\right]}. \quad (2.12)$$

A equação (2.12) apresenta boa concordância desde que se despreze os efeitos mútuos entre as fendas irradiantes. Feito isso, observa-se que o valor típico da impedância de entrada das antenas de microfita retangulares, operando no modo fundamental, sempre será superior a uma centena de ohms. Como a impedância de referência ou de ajuste dos equipamentos, operando na faixa de radiofrequência e micro-ondas, possuem valor específico, normalmente de 50Ω , pode-se ter um problema para a utilização destas antenas nos atuais sistemas de telecomunicações. Isso ocorre, pois, existe um descasamento de impedâncias elevado. Entretanto, pode-se utilizar o conceito da variação da impedância ao longo do ressonador para minimizar esse problema. Sabendo que a impedância varia de modo proporcional ao quadrado do campo elétrico no substrato dielétrico, de acordo com a Figura 2.4, tem-se [28]:

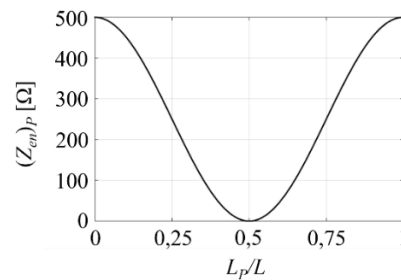
$$(Z_{en})_P = (Z_{en})_E \cos^2\left(\frac{\pi}{L}L_P\right). \quad (2.13)$$

onde L_P é um ponto genérico ao longo do comprimento da antena no qual encontra-se a impedância desejada, que por exemplo pode ser 50Ω . Dessa forma, prolonga-se a linha de alimentação até o ponto onde se obtém o casamento de impedâncias.

Figura 2.4 - Exemplo da variação do ponto de alimentação para modificar a impedância de entrada da antena de microfita retangular.



(a) Variação da posição da alimentação.



(b) Variação da impedância de entrada ao longo do comprimento da antena.

Fonte: O autor.

Para criar o prolongamento da linha de alimentação, adentrando o ressonador, deve-se inserir dois cortes de largura (w_p). Não existe uma formulação específica na literatura para essa variável, entretanto, como apresentado em [29], uma relação de projeto eficiente para essa variável é considerar:

$$w_p \cong \frac{w_\ell}{5} \quad (2.14)$$

2.2.2 ANTENA IMPRESSA COM BANDA LARGA

As antenas de microfita retangulares tipicamente apresentam faixa estreita de operação. Para a alimentação feita a partir de linha impressa, observa-se uma largura de banda fracionária $B_w < 5\%$ [28]. Essa característica é vista como uma das maiores desvantagens desse tipo de antena, de modo que não se apresenta nem um pouco atrativa sua utilização nos requisitos esperados para o 5G (que operando de 3,3 GHz à 3,8 GHz necessitam de uma banda $B_w > 14\%$). Vale destacar que a largura de banda é descrita como $B_w = (f_{\max} - f_{\min})/f_0$, em que $f_{\max}$, $f_{\min}$ e f_0 são, respectivamente, as frequências máxima, mínima e central de operação da antena (os valores de $f_{\max}$ e $f_{\min}$ indicam as frequências limites cujo coeficiente de reflexão (S_{11}) é menor ou igual a -10 dB).

O principal motivo para a faixa estreita de operação das antenas de microfita retangulares é o fato dessas estruturas apresentarem elevado valor de fator de mérito (Q). Esse parâmetro é inversamente proporcional a banda de operação fracionária de uma antena ou qualquer circuito, ou seja, inversamente proporcional a quantos por cento da frequência central de operação é a banda. Pode-se quantificar a B_w em relação à um valor de casamento de impedâncias aceitável, que pode ser dado pelo coeficiente de onda estacionária máximo ($VSWR_{\max}$), da seguinte forma [28]:

$$B_w(\%) = \frac{VSWR_{\max} - 1}{Q\sqrt{VSWR_{\max}}} \quad (2.15)$$

É comum definir o valor de $VSWR_{\max} = 1,92$ (que garante um coeficiente de reflexão $S_{11} = -10$ dB, de modo que ao menos 90% da energia que é entregue a antena possa ser convertida em onda eletromagnética). Assim, pode-se escrever $B_w \cong 0,66/Q$.

O fator de mérito é inversamente proporcional   potência dissipada na antena. Essa potência pode ser entendida com a irradiação, quantificada por Q_{rad} , e as perdas de energia, ligadas à eficiência de irradiação, descritas pelos fatores de mérito devido as perdas por ondas de superfície (Q_{sur}), as perdas nos condutores (Q_c) e as perdas no dielétrico (Q_d), de modo que [28]:

$$\frac{1}{Q} = \frac{1}{Q_{rad}} + \frac{1}{Q_{sur}} + \frac{1}{Q_c} + \frac{1}{Q_d}. \quad (2.16)$$

Para aumentar a largura de faixa da antena é necessário reduzir o valor de Q . Entretanto, para evitar perdas que levem   redu   o na potência efetivamente irradiada pela antena, é aconselhável trabalhar em Q_{rad} . Sabe-se que Q_{rad} é inversamente proporcional à espessura do laminado dielétrico, h , e   condutância de entrada, G_1 , e diretamente proporcional   constante dielétrica efetiva, ϵ_{ref} ,   frequência, f_r , e   um fator expresso pela razão da potência contida na área e no perímetro de uma esfera que envolve a irradiação da antena, K (que para o modo o modo fundamental, tem-se $K = L/4$), descrito com [28]:

$$Q_{rad} = \frac{4\pi f_r \epsilon_{ref}}{h} \frac{K}{G_1}. \quad (2.17)$$

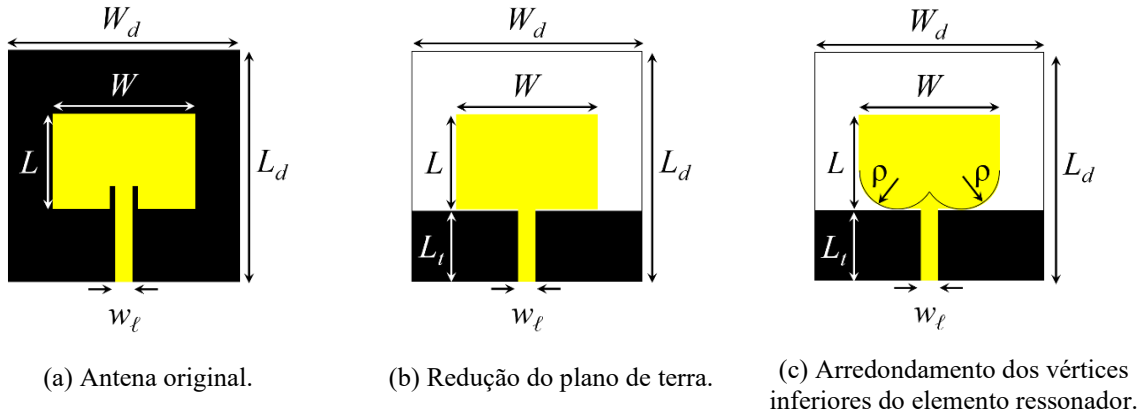
Pode-se reduzir o valor de Q_{rad} de algumas formas, dentre elas, destacam-se aumentar a altura do substrato e reduzir   constante dielétrica efetiva. A primeira estratégia pode se tornar pouco atrativa devido ao aumento das dimensões da antena. Por isso, na maioria dos casos, trabalhar com ϵ_{ref} é uma solução mais atraente. Uma das maneiras mais simples e eficiente de se obter esse efeito é apresentada em [26] e, devido à simplicidade, essa estratégia será explorada nesse trabalho para o alargamento da faixa de operação da antena de microfita retangular. Tal técnica consiste em modificar a antena original (Figura 2.5(a)), retirando os cortes casadores de impedância e reduzindo primeiramente o plano terra é um comprimento L_t (Figura 2.5(b)) e por fim arredondando os vértices inferiores do ressonador de acordo com um raio ρ . Para o estudo realizado nesse trabalho (que será apresentado no Capítulo 4), propõem-se o equacionamento para L_t e ρ , conforme apresentado em [30]:

$$L_t = L_\ell + m(L_d - L_\ell) \quad e \quad (2.17)$$

$$\rho = nW . \quad (2.18)$$

onde L_ℓ é o comprimento da linha de alimentação (que seguindo os estudos de [26] é definido como $0,55L$), L_d é o comprimento do laminado dielétrico e m e n são as constantes multiplicativas (que variam de 0 a 1) a serem estudadas. É importante destacar que L_d , assim como para a largura (W_d) do dielétrico não há uma formulação específica, sendo adotado como referência os valores estudados e definidos em [26] como sendo $L_d \cong L_\ell + L + 0,25L$ e $W_d \cong 1,5W$.

Figura 2.5 - Técnica de modificação em uma antena de microfita para criar uma antena impressa faixa larga.



Fonte: Adaptado de [30].

2.3 REDE DE ANTENAS FAIXA LARGA COM DIAGRAMA DE IRRADIAÇÃO RECONFIGURÁVEL

O *beamforming* é um método que visa a variação do feixe irradiado por um sistema de antenas. Dessa forma, pode-se trabalhar irradiadores mais diretivos (que concentram a energia em uma área pequena) para emitir o sinal em uma grande área de cobertura (ver na Figura 1.1). Assim, pode-se obter sinais do receptor com maior intensidade, aumentando a relação sinal-ruído e consequentemente a capacidade do canal rádio móvel.

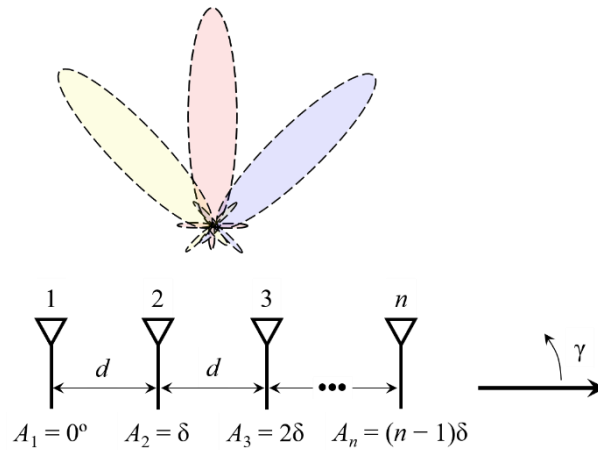
Como descrito na Problematização do Capítulo 1, existem diversas formas de obter *beamforming*. Entretanto, uma das formas mais simples é utilizando uma rede linear uniforme de antenas (como na Figura 2.6). Define-se uma rede linear uniforme como um conjunto de antenas iguais, dispostos sobre uma linha (denominada como eixo da rede) em os elementos

são igualmente espaçados à uma distância d e as correntes de excitação devem ter a mesma amplitude e defasagem constante entre as antenas vizinhas. Assim, da formulação de fator de rede, tem-se [27]:

$$\cos(\gamma) = -\frac{\delta}{kd}, \quad (2.20)$$

onde γ é o ângulo que aponta a direção de máxima irradiação em relação ao eixo da rede, δ é defasagem temporal na alimentação de cada antena, $k = 2\pi/\lambda$ (onde λ é o comprimento de onda) é o número de onda no espaço livre. Dessa forma, ao variar a fase da alimentação das antenas produz-se a variação espacial do feixe irradiado.

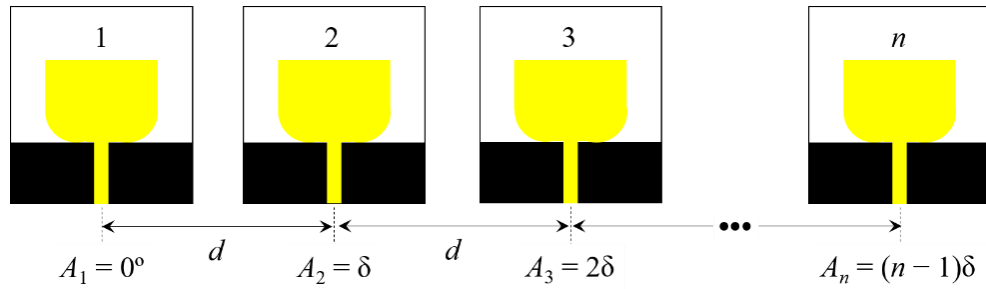
Figura 2.6 - Rede linear uniforme de antenas.



Fonte: O autor.

Para o projeto da rede de antenas impressas faixa larga com diagrama de irradiação reconfigurável para aplicações em 5G propõe-se a criação de uma rede linear de antenas impressas banda da larga (conforme a Figura 2.7). Para tal, definiu-se a distância de centro a centro (d) entre os elementos como sendo $3/4$ de comprimento de onda guiado no laminado dielétrico (com W é aproximadamente meio comprimento de onda guiado, propôs-se $d = 1,5W$) [27].

Figura 2.7 - Rede de antenas impressas faixa larga com diagrama de irradiação reconfigurável.



Fonte: O autor

2.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste Capítulo apresentou-se de modo simples e o objetivo o referencial teórico sobre antenas de microfita retangulares, antenas impressas banda larga e redes lineares uniformes de antenas impressas faixa larga. A partir dessas informações, acredita-se ter os conceitos necessários para projetar e analisar a antena proposta neste trabalho de conclusão de curso.

CAPÍTULO 3

MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentados os conceitos sobre a metodologia e os recursos utilizados no desenvolvimento deste projeto.

3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Este trabalho de conclusão de curso tem como objetivo principal o projeto numérico de uma rede de antenas faixa larga capaz de prover *beamforming* em 5G NR operando de 3,3 GHz à 3,8 GHz. Dessa forma, a metodologia adotada teve como base o estudo teórico (em livros e artigos) e simulações eletromagnéticas a partir de métodos de cálculo numérico (o método dos elementos finitos) no programa comercial *Ansys Electronics Desktop*.

3.2 METODOLOGIA DE DESENVOLVIMENTO

O trabalho consiste em um conjunto de estudos no simulador, realizado com o objetivo de atender métricas de desempenho definidas a partir do casamento de impedâncias (dado pelo estudo do coeficiente de reflexão) e da irradiação (dada pelo estudo de diagramas de irradiação de ganho). Então, a metodologia de desenvolvimento foi subdividida em três partes:

- i) Projeto e análise da antena de microfita retangular (avaliando as métricas de impedância de entrada, coeficiente de reflexão e diagramas de irradiação de ganho).
- ii) Projeto de análise da antena impressa faixa larga (avaliando as métricas de densidade superficial de corrente, impedância de entrada, coeficiente de reflexão e diagramas de irradiação de ganho).
- iii) Projeto de análise da rede linear uniforme de antenas impressas faixa larga (avaliando as métricas de coeficiente de reflexão e diagramas de irradiação de ganho).

Em cada uma das partes foram definidas todas as suas dimensões, iniciando pelo projeto de uma antena de microfita, posteriormente pelo projeto de uma antena de microfita faixa larga, e por fim o projeto uma rede de antenas com as antenas de microfita faixa larga. Após isso, em cada parte realizou-se a modelagem dos projetos em um ambiente computacional, e em sequência simulação, onde obteve-se parâmetros importantes dos projetos como o valor dos coeficientes de reflexão, da impedância das antenas, além dos diagramas de irradiação das mesmas.

3.3 RECURSOS NECESSÁRIOS

Os projetos propostos nesse trabalho foram executados em ambiente de simulação numérica no programa *Ansys Electronics Desktop*, utilizando o módulo de simulação HFSS (*High Frequency Structure Simulator*). Para isso, utilizou-se a versão estudante do simulador [31]. É válido destacar que essa versão, gratuita para estudantes, tem limite computacional definido pela discretização da geometria de no máximo 64.000 elementos para volume 3D. Dessa forma, entre outras coisas, destaca-se limitação nas dimensões das geometrias estudadas, sendo possível projetar com no máximo quatro antenas.

3.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste Capítulo apresentou-se a metodologia e os recursos necessários para o desenvolvimento desse trabalho de conclusão de curso. Essas informações são base para definir o roteiro do desenvolvimento apresentado em maiores detalhes no Capítulo 4.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados dos estudos realizados desse trabalho de conclusão de curso. Assim, procurou-se discutir cada etapa do desenvolvimento.

4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O projeto da antena desenvolvida nesse trabalho tem como base os conceitos teóricos apresentados no Capítulo 2, seguindo a metodologia apresentada no Capítulo 3. Por esse motivo, as construções dos modelos numéricos, bem como as análises de simulação são divididas em: antena de microfita retangular, antena impressa faixa larga e rede linear uniforme de antenas.

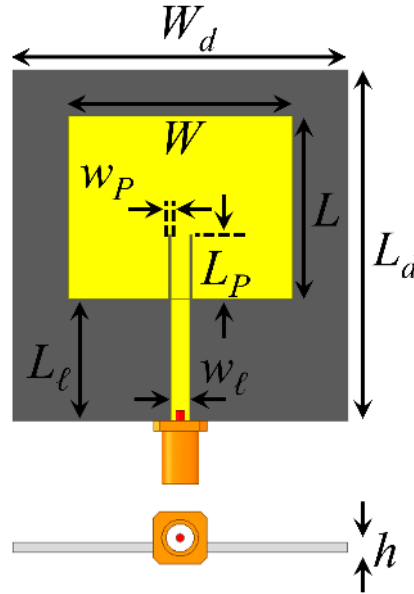
4.2 PROJETO DA ANTENA DE MICROFITA RETANGULAR

O passo inicial do projeto da antena apresentado nesse trabalho se deu pela criação do modelo numérico e análise de uma antena de microfita retangular.

Para isso, seguindo a descrição de variáveis apresentadas na Figura 4.1, determinou-se as dimensões da antena seguindo a razão de proporcionalidade do artigo de referência [26], escrevendo todas as variáveis em função do comprimento L do elemento ressonador, uma vez que essa é a principal responsável pela frequência de ressonância.

Assim, tem-se $W \cong 1,218L$, $L_\ell \cong 0,55L$, $W_\ell \cong 0,1L$, $L_d \cong L_\ell + L + 0,25L \cong 1,8L$, $w_d \cong 1,5W \cong 1,827L$, $L_p \cong 0,35L$ e $w_p \cong 0,2W_\ell \cong 0,02L$. Tal técnica foi proposta e eficientemente executada em [30], por isso, definiu-se essa estratégia.

Figura 4.1 – Descrição das variáveis do modelo numérico da antena de microfita retangular.

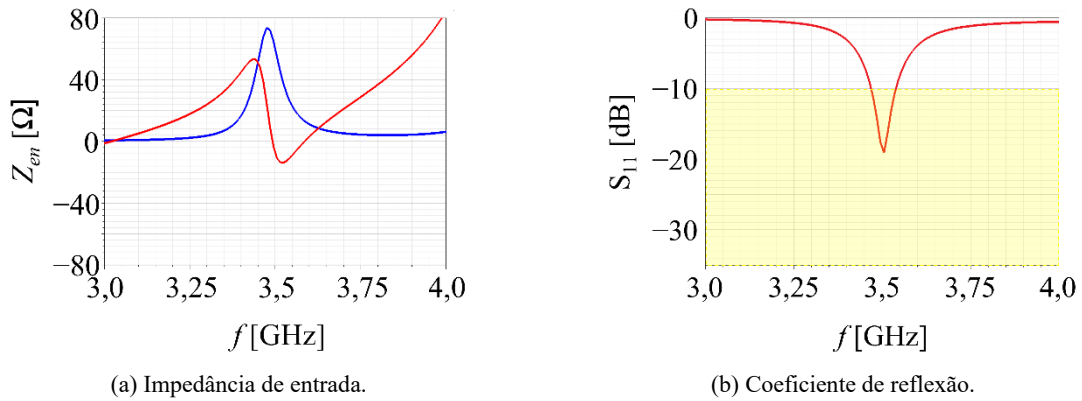


Fonte: O autor.

Todas as variáveis descritas na Figura 4.1 podem ser determinadas a partir do valor encontrado para L . O valor de L , como apresentado no Capítulo 2, é dependente do substrato dielétrico e da frequência de ressonância desejada. Então, utilizando para o substrato dielétrico Rogers 5880 com $\epsilon_r = 2,2$ e $h = 1,575$ mm produzido pela empresa Rogers Corporation [32], considerando a frequência de ressonância de 3,5 GHz (frequência central a faixa de interesse do projeto), chegou-se à obtendo $L \cong 27,5$ mm, $W \cong 33,5$ mm, $L_\ell \cong 15,1$ mm, $W_\ell \cong 2,7$ mm, $L_d \cong 52,7$ mm, $W_d \cong 50,2$ mm, $L_p \cong 9,6$ mm e $w_p \cong 0,5$ mm. Então, construiu-se um modelo numérico no simulador *Ansys Electronics Desktop* e analisou-se os resultados conforme as Figuras 4.2 e 4.3.

Na Figura 4.2(a) tem-se a resposta em frequência da impedância de entrada da antena de microfita retangular. Observa-se o comportamento típico dessas antenas, onde se tem a frequência de ressonância em 3,5 GHz, em que a parte imaginária (curva vermelha) assume o valor de 0Ω e a parte real (na curva em azul) apresenta o valor bem próximo a 70Ω . Como esse comportamento tem-se o coeficiente de reflexão, na Figura 4.2(b), na frequência de 3,5 GHz com o valor de aproximadamente -20 dB, e banda (quantificada pela faixa de frequências em que $S_{11} \leq -10$ dB) é $BW \cong 2,2\%$ (3,46 GHz à 3,54 GHz).

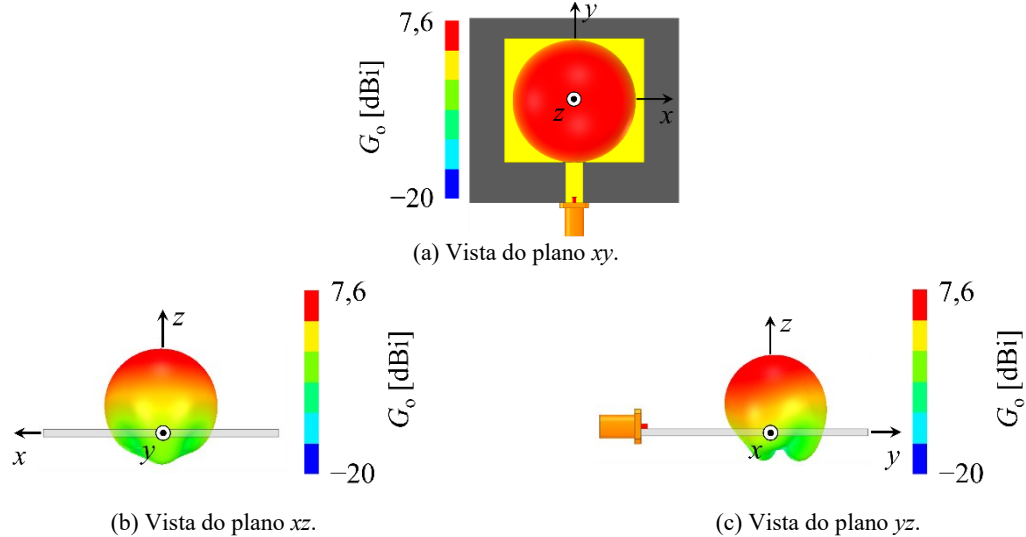
Figura 4.2 - Resposta em frequência dos parâmetros de impedância da antena de microfita.



Fonte: O autor.

Na Figura 4.3 tem-se o comportamento do diagrama de irradiação de ganho da antena de microfita retangular no formato tridimensional para algumas posições específicas para a frequência de 3,5 GHz. Observa-se que antena possui irradiação direcional, como a direção de máximo em $+z$ (o que em coordenadas esféricas refere-se em $\theta = 0^\circ$, em todos os valores ϕ) com ganho de 7,6 dBi. Tipicamente as antenas de microfita retangulares apresentam ganho variando entre 7 dBi e 8dBi (dependendo das variáveis envolvidas no projeto), sendo o valor observado condizente com a teoria apresenta em [28].

Figura 4.3 - Comportamento do diagrama de irradiação de ganho da antena de microfita retangular na frequência de 3,5GHz.



Fonte: O autor.

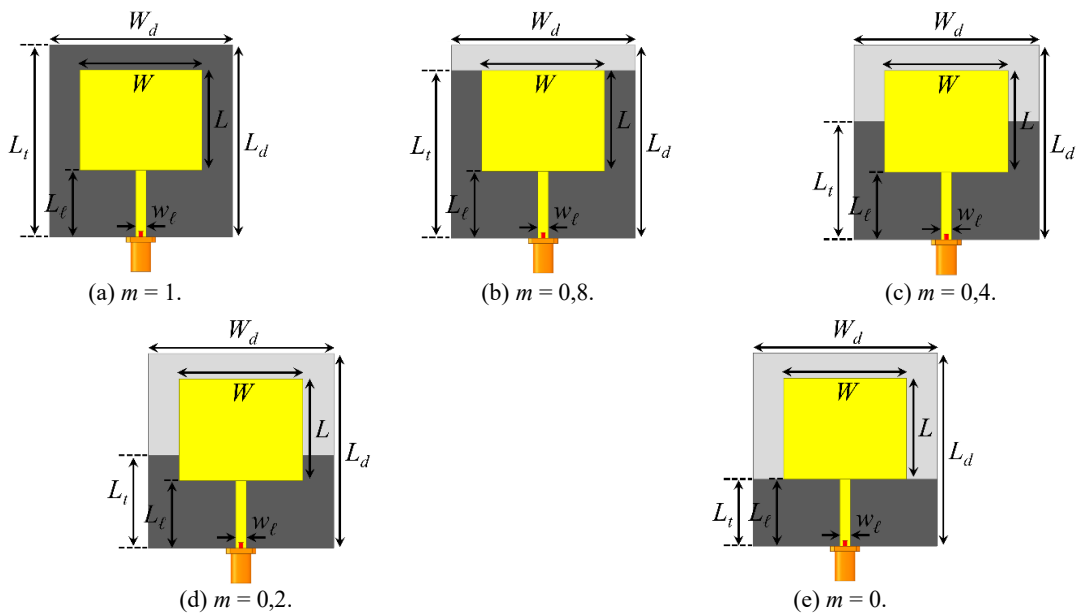
4.3 PROJETO DA ANTENA IMPRESSA FAIXA LARGA

A antena de microfita apresenta da seção 4.2 possui características típicas (banda e ganho) conforme esperado. Principalmente olhando para a banda observada, nota-se que essas características não atendem as características esperadas para o projeto, que é operar de ao menos 3,3 GHz à 3,8 GHz. Por esse motivo, a segunda etapa do desenvolvimento proposto nesse trabalho é o projeto de uma antena impressa faixa larga, em que se tem como referência principal o artigo [26]. Assim, essa etapa é composta por dois estudos: a retirada dos cortes casadores de impedância e redução do plano terra e o arredondamento dos vértices inferiores do elemento ressonador.

4.3.1 Redução do plano terra

Para o estudo da redução (ver na Figura 4.4), primeiramente, deve-se retirar os cortes casadores de impedância e em seguida reduzir o comprimento L_t de acordo com a equação 2.17. É importante destacar que se definiu a constante multiplicativa m como a variável que controla a redução do plano terra. Assim, se $m = 1$ o plano terra fica sob toda a antena, se $m = 0$ o plano terra fica sob apenas a linha de alimentação (o ressonador fica todo sem o plano terra) e caso $0 < m < 1$ tem-se o plano terra sob partes diferentes do elemento ressonador.

Figura 4.4 – Ilustração do estudo da redução do plano terra da antena de microfita retangular.



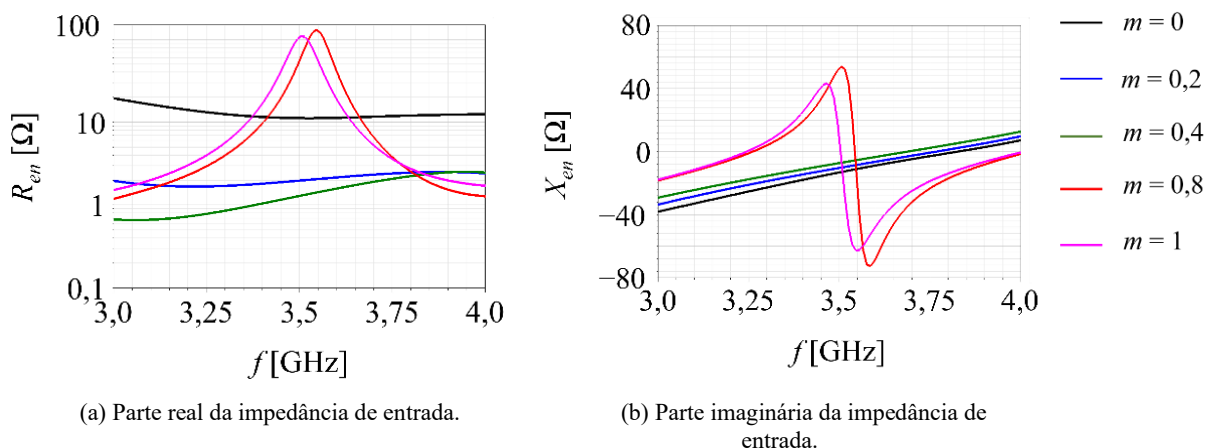
Fonte: Adaptado de [30].

Na Figura 4.5 tem-se o comportamento da impedância de entrada da antena em função da redução do comprimento do plano terra. Observa-se que para $m = 1$, onde apenas retirando os cortes casadores de impedância, tem-se a ressonância próxima a 3,5 GHz, todavia, com valores da parte real próximos 100 Ω . Esse comportamento já era previsto, uma vez que sem os cortes (que atuam como casadores faixa estreita) a impedância das antenas de microfita na ressonância é puramente real, com valores que podem chegar a algumas centenas de Ohms.

Para $m = 0,8$ tem-se pouca variação na resposta da impedância de entrada da antena, exceto por um leve deslocamento da frequência de ressonância para frequências maiores. Para $m = 0,4$ a transição abrupta da parte imaginária da impedância (característica das antenas de microfita por terem alto fator de mérito) já praticamente deixou de existir, tendo um comportamento quase linear na faixa estuda, com valores mais próximos de zero em quase todas as frequências se comparado a $m = 0,8$ e $m = 1$. Nessa condição ($m = 0,4$), tem-se também um comportamento quase plano da parte real ao longo da frequência, porém, com valores bem inferiores a 50 Ω , o que ainda não é algo atrativo para levar à um bom casamento de impedância (com $S_{11} \leq -10$ dB). Para $m = 0,2$ nota-se que impedância tem comportamento análogo ao comportamento observado em $m = 0,4$, porém com a parte real levemente estando mais próxima de 50 Ω que para a condição anterior. Para $m = 0$, nota-se que parte imaginária da impedância é muito parecida com $m = 0,2$ e $m = 0,4$, enquanto a parte real, mesmo que ainda não em uma condição ideal se aproximou bem mais de 50 Ω .

Desse modo, chega-se à conclusão de que $m = 0$ é o tamanho ideal para o plano terra, não sendo possível reduzir mais seu valor sem que a linha de alimentação (que é uma linha de microfita e necessita de terra) perca parte do plano terra, mudando assim sua característica de guiamento da onda.

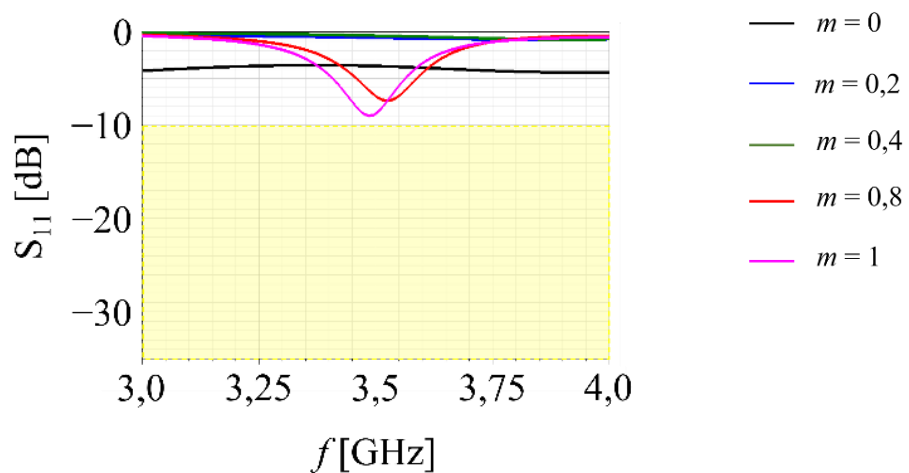
Figura 4.5 - Comportamento da impedância de entrada da antena com a redução do comprimento do plano terra.



Fonte: O autor.

No estudo apresentado na Figura 4.5 pode ser observado de outra maneira a partir do coeficiente de reflexão. Nesse caso, o principal benefício é poder quantificar a banda de operação para a faixa de frequências em que $S_{11} \leq -10\text{dB}$. Entretanto, conforme a Figura 4.6, observa-se que mesmo no melhor caso, obtido para a configuração $m = 0$, não há frequências em que $S_{11} \leq -10\text{ dB}$. Porém, para $m = 0$ tem-se um comportamento quase plano do S_{11} , com $S_{11} = -5\text{ dB}$ em praticamente toda a faixa. Basicamente, como descrito em [26], isso ocorre pois há uma transição abrupta (grande diferença de dimensões) entre as larguras da linha de alimentação e do ressonador, de modo a gerar uma diferença de impedância que maximiza as reflexões. Assim, como solução aplica-se a segunda técnica de modificação que consiste no arredondamento dos vértices na borda inferior do ressonador.

Figura 4.6 - Comportamento do coeficiente de reflexão da antena com a redução do comprimento do plano terra.

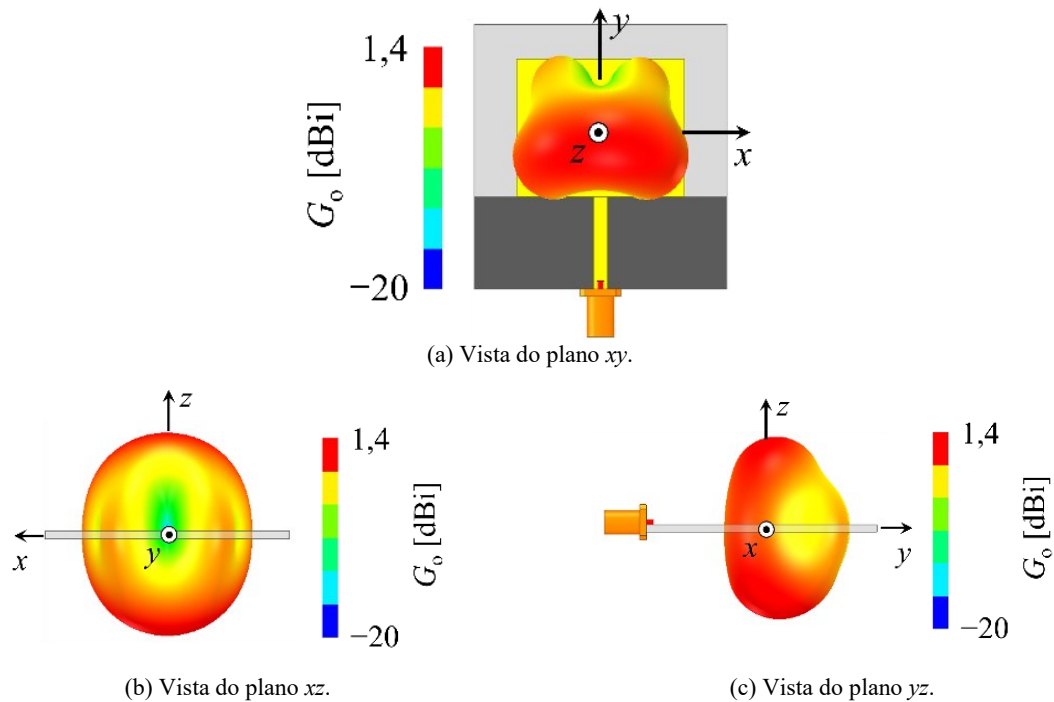


Fonte: O autor.

A Figura 4.7 apresenta o comportamento do diagrama de irradiação de ganho da antena com o plano de terra truncado (com $m = 0$) para a frequência de 3,5 GHz. Observa-se com a redução do plano terra, de modo que todo o elemento ressonador fica sem a influência desse condutor, e deixa de apresentar irradiação direcional, passando a irradiar de modo tendendo a ser onidirecional no plano xz .

Com isso, devido a distribuição da energia para uma faixa maior no entorno da antena, o ganho reduz-se chegando ao valor de 1,4 dBi. Tal valor não é visto como problema, uma vez que a métrica principal do trabalho é banda e não ganho.

Figura 4.7 - Comportamento do diagrama de irradiação de ganho da antena com o plano de terra truncado na frequência de 3,5GHz.

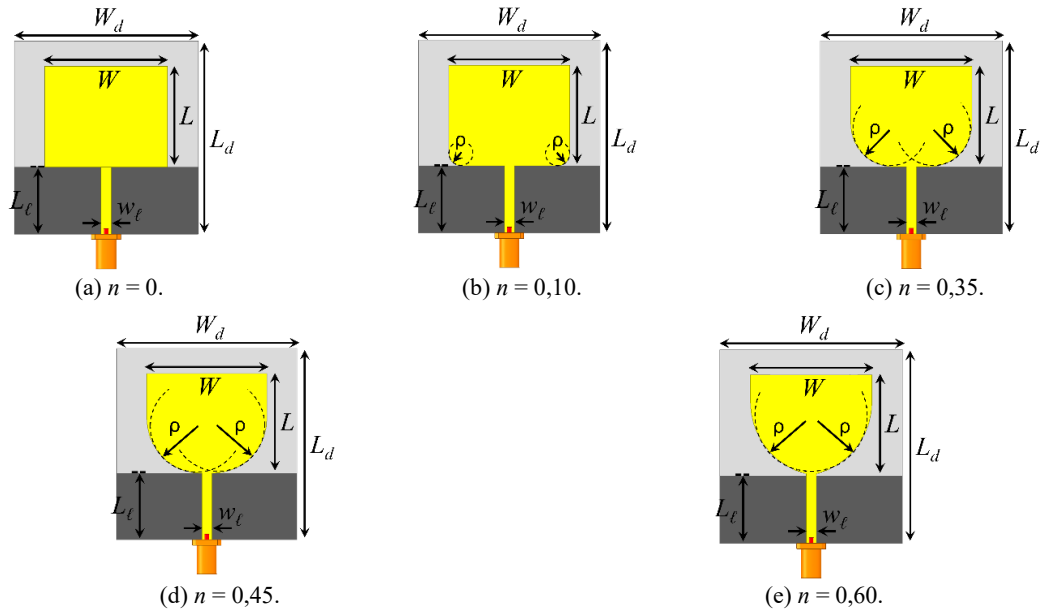


Fonte: O autor.

4.3.2 Arredondamento dos vértices

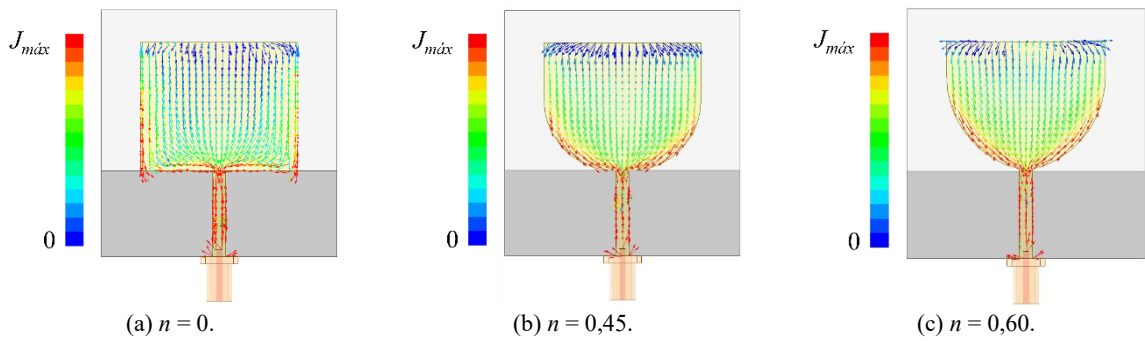
Para o arredondamento dos vértices inferiores do ressonador adotou-se a configuração ilustrada na Figura 4.8. Para tal, tem-se como variável de alteração o ρ , que é modificado a partir da constante multiplicativa n , conforme a equação 2.18. Assim, se $n = 0$ tem-se o ressonador igual ao da antena apenas com o plano de terra truncado com $m = 0$. Caso $n > 0$ tem-se um gradativo arredondamento dos vértices inferiores do ressonador, de modo que a transição abrupta é suavizada. Tal suavização modifica a distribuição de cargas que tende a se acumular na borda inferior do ressonador, conforme a Figura 4.9. Quando $n = 0$ observa-se o acúmulo de cargas (representado pela densidade superficial de corrente J), que é mais evidente nos vértices. Com o arredondamento, essas cargas tendem a se acomodar melhor ao longo do contorno do ressonador, isso facilita o deslocamento da onda vinda da linha de transmissão para o ressonador, de modo a minimizar reflexões existentes.

Figura 4.8 - Ilustração do estudo do arredondamento dos vértices inferiores da antena com o plano de terra truncado.



Fonte: Adaptado de [30].

Figura 4.9 - Ilustração do comportamento da densidade superficial de corrente com o arredondamento dos vértices inferiores da antena com o plano de terra truncado.



Fonte: O autor.

Na Figura 4.10 tem-se o comportamento da impedância de entrada da antena em função do arredondamento dos vértices inferiores para a geometria já com o plano terra truncado. Observa-se que com o aumento do valor de n , as partes reais e imaginárias da impedância tendem a se aproximar, respectivamente de 50Ω e 0Ω . Entretanto, observa-se que a melhora não é mais intensa à medida que maior for o n , mas sim tem o valor ideal quando $n = 0,6$. Tal resultado é mais fácil de ser observado a partir do coeficiente de reflexão ilustrado na Figura 4.11. Percebe-se que a melhora significativa do S_{11} se dá a partir de $n = 0,35$, sendo que para $n = 0,45$ já se observa a banda antena praticamente em toda a faixa de 3 GHz à 4 GHz. Quando n

$= 0,6$ o S_{11} assume os melhores valores, sendo que para $n = 0,65$ uma leve piora já é observada. Assim, definiu-se como melhor caso $n = 0,6$, em que a faixa observada compreende desde antes de 3 GHz até após 4 GHz, caracterizando uma $Bw > 28,5\%$.

Figura 4.10 - Comportamento da impedância de entrada da antenna ao estudar o arredondamento dos vértices inferiores da antenna com o plano terra truncado.

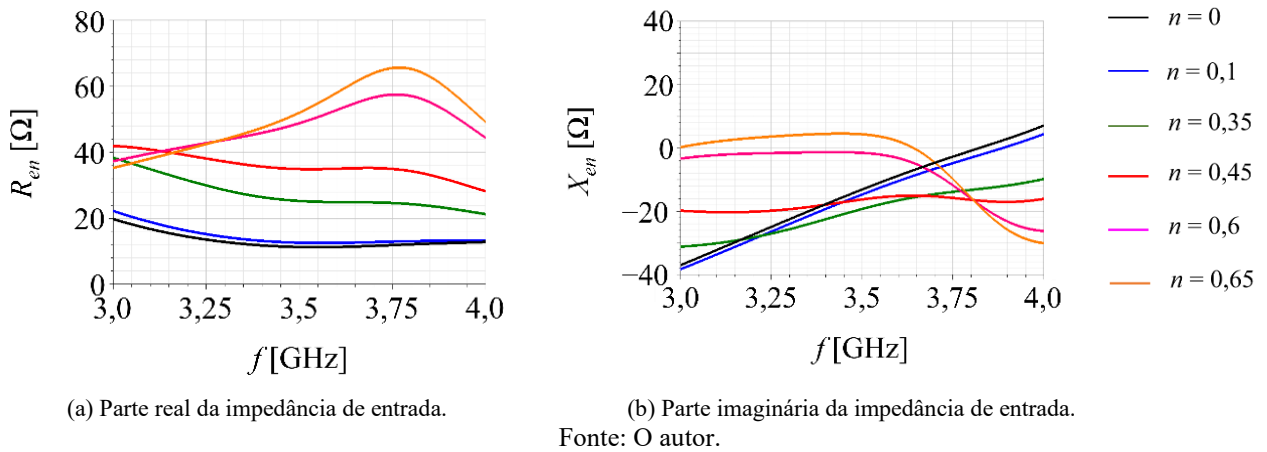
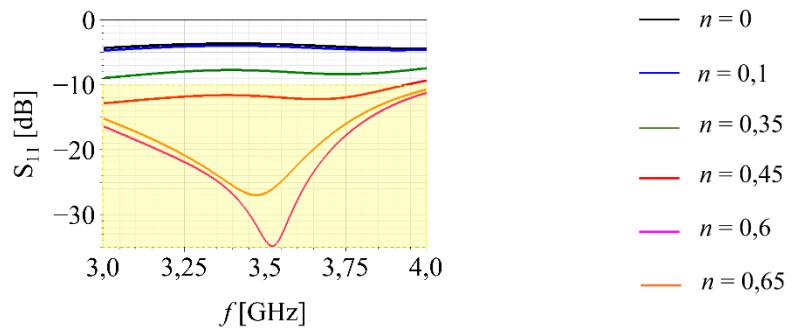
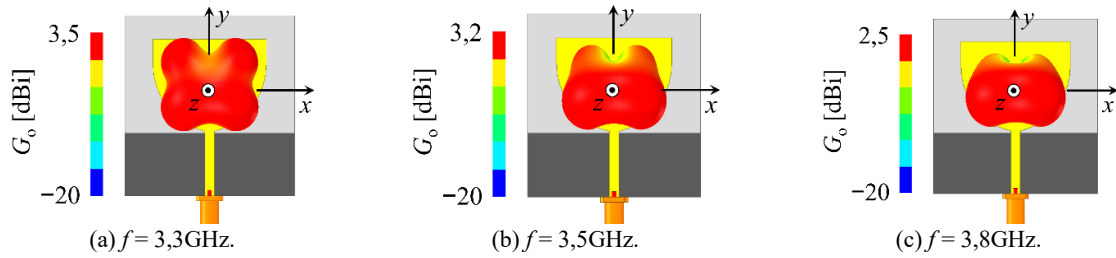


Figura 4.11 - Comportamento do coeficiente de reflexão da antenna ao estudar a redução do comprimento do plano terra.



A Figura 4.12 apresenta o comportamento do diagrama de irradiação de ganho da antenna com o plano de terra truncado (com $m = 0$) e vértices arredondados (com $n = 0,6$) para as frequências 3,3 GHz, 3,5 GHz e 3,8 GHz, importantes dentre as aplicações de 5G no Brasil. Nota-se que o comportamento é similar ao observado apenas para antenna com plano terra truncado (ver na Figura 4.7). Em toda a faixa a antenna tende a irradiar de modo tendendo onidirecional no plano xz, e essa será uma característica importante na construção da rede linear uniforme de antenas proposta nesse trabalho. Outro fato importante é que a variação nos valores de ganho é de no máximo 1dB, sendo observado 3,5 dBi, 3,2 dBi e 2,5 dBi para, respectivamente, 3,3 GHz, 3,5 GHz e 3,8 GHz.

Figura 4.12 - Comportamento do diagrama de irradiação de ganho da antenna para $n = 0,6$.

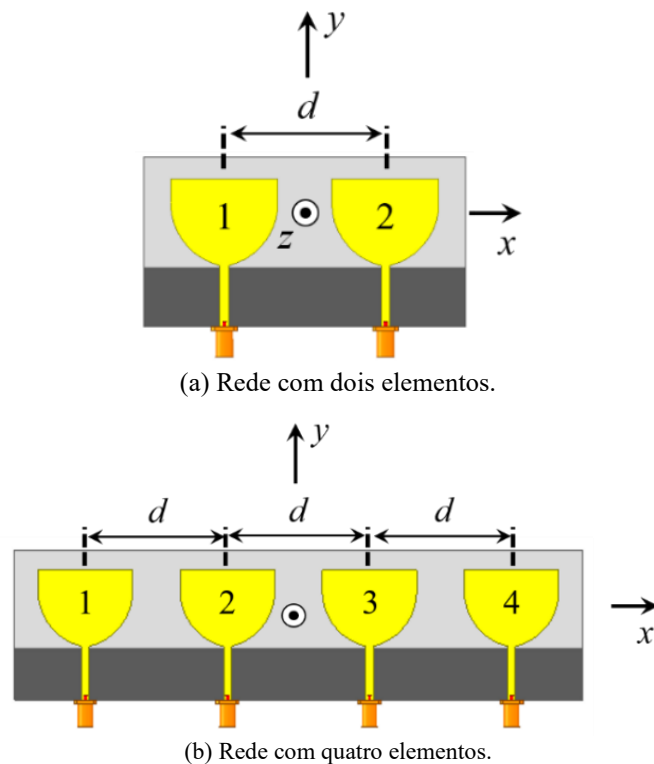


Fonte: O autor.

4.4 PROJETO DA REDE LINEAR UNIFORME

O passo final do projeto proposto nesse trabalho é a criação de uma rede linear uniforme com as antenas impressas faixa larga desenvolvidas na seção 4.3. Para tal, como descrito no Capítulo 2, definiu-se o espaçamento entre as antenas na rede como sendo $d = 1,5W \cong 50,22\text{ mm}$ (ver na Figura 4.13). Como apresentado no Capítulo 3, devido a limitação na versão estudante do *Ansys Electronics Desktop* (que foi utilizado nas simulações), para provar o conceito projetou-se a rede com dois e quatro elementos.

Figura 4.13 - Configurações da rede linear uniforme de antenas impressas faixa larga.



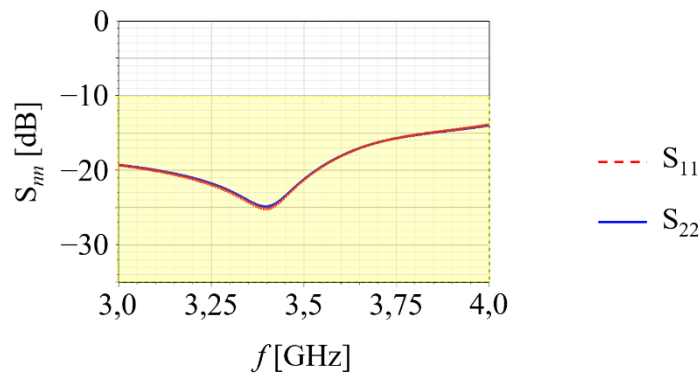
Fonte: O autor.

4.4.1 Rede com dois elementos

Para a rede com dois elementos adotou-se a configuração ilustrada na Figura 4.13(a). Assim, tem-se duas antenas com alimentação independentes, dispostas em uma linha reta, espaçadas $d = 1,5W \cong 50,22$ mm. É importante destacar que as duas antenas foram alimentadas com sinais de potência de 1W (valor genérico configurado no simulador), sendo possível variar a defasagem temporal entre essas alimentações de acordo com a varável δ apresentada no Capítulo 2.

A Figura 4.14 apresenta a resposta em frequência da rede com dois elementos. Observa-se, primeiramente, que como agora existem duas portas de alimentação, tem-se o coeficiente de reflexão da porta 1 (S_{11}) e da porta 2 (S_{22}). Nota-se também, em comparação com apenas uma antena trabalhando de forma independente (ver Figura 4.11), que há uma mudança no comportamento do coeficiente de reflexão. Isso ocorre devido ao efeito de acoplamento mútuo entre os elementos na rede. Todavia, tal efeito não é suficiente para prejudicar a banda de operação, de modo que a faixa observada compreende de desde antes de 3 GHz até após 4 GHz, caracterizando uma $BW > 28,5\%$.

Figura 4.14 - Comportamento do coeficiente de reflexão da rede linear uniforme de antenas impressas faixa larga com dois elementos.

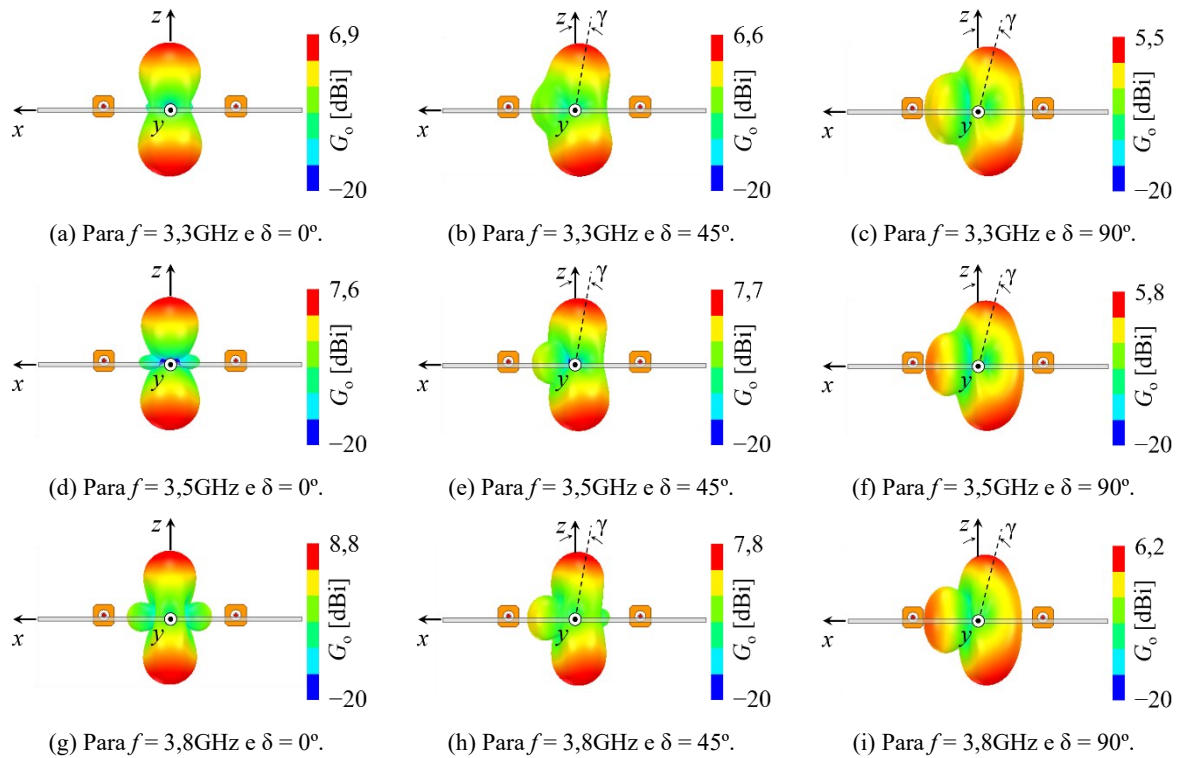


Fonte: O autor.

Após validar o comportamento da resposta em frequência do coeficiente de reflexão da rede com dois elementos, analisou-se o comportamento do diagrama de irradiação de ganho para as frequências de 3,3 GHz, 3,5 GHz e 3,8 GHz, conforme a Figura 4.15. Para tal, admitiu-se as defasagens temporais $\delta = 0^\circ$, $\delta = 45^\circ$ e $\delta = 90^\circ$. Para $\delta = 0^\circ$, independente da frequência, tem-se o comportamento da irradiação transversal, com máxima irradiação formando um

ângulo de 90° com o eixo da rede, e consequentemente um ângulo de variação do feixe irradiado $\gamma = 0^\circ$. Para $\delta = 45^\circ$ observa-se o deslocamento um ângulo de variação do feixe irradiado, em que tem-se $\gamma = 8^\circ$, $\gamma = 6^\circ$ e $\gamma = 6^\circ$ para, respectivamente, 3,3 GHz, 3,5 GHz e 3,8 GHz. Para $\delta = 90^\circ$ observa-se o deslocamento um ângulo de variação do feixe irradiado, em que tem-se $\gamma = 16^\circ$, $\gamma = 12^\circ$ e $\gamma = 12^\circ$ para, respectivamente, 3,3 GHz, 3,5 GHz e 3,8 GHz. Observa-se que quanto maior é o δ , menor é o valor do ganho observado, visto que tem o aumento de lóbulos laterais. Todavia, a variação máxima é inferior a 3 dB em todos os casos.

Figura 4.15 - Comportamento do diagrama de irradiação de ganho em 3D da rede linear uniforme de antenas impressas faixa larga com dois elementos.



Fonte: O autor.

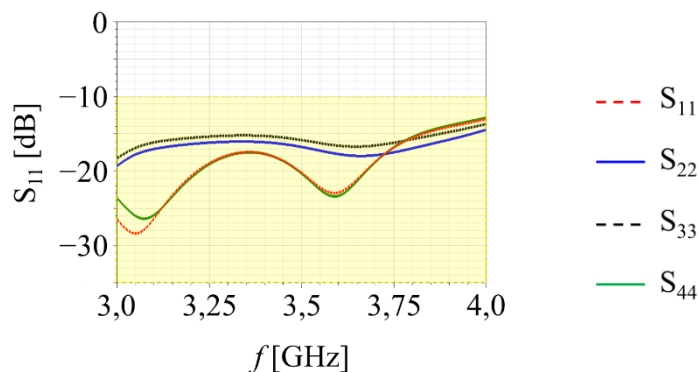
A partir dos resultados apresentados, valida-se o conceito de uma antena faixa larga com diagrama de irradiação reconfigurável aplicada a redes celulares 5G na faixa de 3,5 GHz. Entretanto, tendo em vista maximizar a capacidade de canal (como apresentado no Capítulo 1) deseja-se obter valores mais elevados de ganho. Por isso, propõe-se também a rede com quatro elementos.

4.4.2 Rede com quatro elementos

Para a rede com quatro elementos adotou-se a configuração ilustrada na Figura 4.13(b). Assim, tem-se quatro antenas com alimentação independentes, dispostas em uma linha reta, espaçadas $d = 1,5W \cong 50,22$ mm. Novamente, é importante destacar que as quatro antenas foram alimentadas com sinais de potência de 1 W (valor genérico configurado no simulador), sendo possível variar a defasagem temporal entre essas alimentações de acordo com a varável δ apresentada no Capítulo 2.

A Figura 4.16 apresenta a resposta em frequência da rede com quatro elementos. Observa-se, primeiramente, que como agora existem quatro portas de alimentação, tem-se o coeficiente de reflexão da porta 1 (S_{11}), da porta 2 (S_{22}), da porta 3 (S_{33}) e da porta 4 (S_{44}). Nota-se também, em comparação com apenas uma antenna trabalhando de forma independente (ver Figura 4.11) e em relação a rede com dois elementos (ver Figura 4.14), que há uma mudança no comportamento do coeficiente de reflexão devido ao efeito de acoplamento mútuo entre os elementos na rede. Os comportamentos são similares de duas em duas antenas, as antenas externas (1 e 4) são similares e as internas (2 e 3) também são. Todavia, mesmo com o acoplamento mútuo, não há efeito suficiente para prejudicar a banda de operação, de modo que a faixa observada compreende desde antes de 3 GHz até após 4 GHz, caracterizando uma $BW > 28,5\%$.

Figura 4.16 - Comportamento do coeficiente de reflexão da rede linear uniforme de antenas impressas faixa larga com quatro elementos.

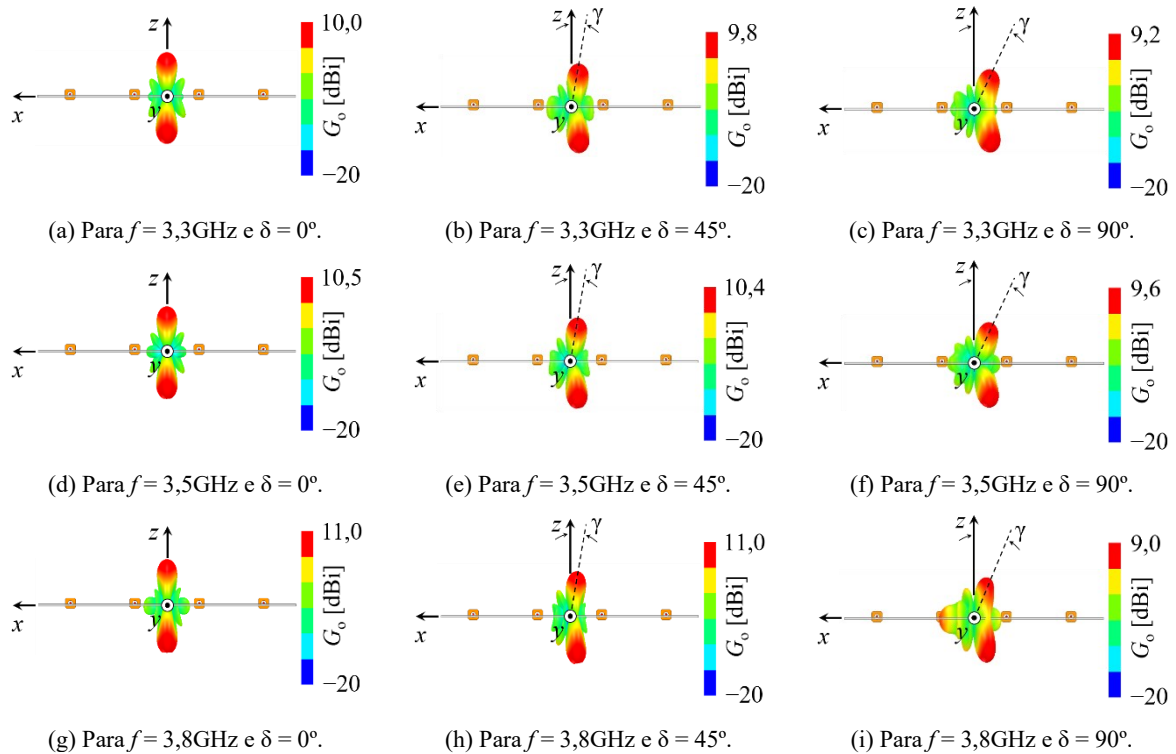


Fonte: O autor.

A Figura 4.17 apresenta o comportamento do diagrama de irradiação de ganho da rede com quatro elementos para as frequências de 3,3 GHz, 3,5 GHz e 3,8 GHz. Para tal, admitiu-se

novamente as defasagens temporais $\delta = 0^\circ$, $\delta = 45^\circ$ e $\delta = 90^\circ$. Para $\delta = 0^\circ$, independente da frequência, tem-se o comportamento da irradiação transversal, com máxima irradiação formando um ângulo de 90° com o eixo da rede, e consequentemente um ângulo de variação do feixe irradiado $\gamma = 0^\circ$, com ganho sempre maior que 10 dBi. Para $\delta = 45^\circ$ observa-se o deslocamento um ângulo de variação do feixe irradiado, em que $\gamma = 12^\circ$, $\gamma = 12^\circ$ e $\gamma = 10^\circ$ para, respectivamente, 3,3 GHz, 3,5 GHz e 3,8 GHz, com ganho sempre maior que 9,8dBi. Para $\delta = 90^\circ$ observa-se o deslocamento um ângulo de variação do feixe irradiado, em que $\gamma = 25^\circ$, $\gamma = 23^\circ$ e $\gamma = 19^\circ$ para, respectivamente, 3,3 GHz, 3,5 GHz e 3,8 GHz, com ganho sempre maior que 9dBi. Observa-se que a variação máxima nos valores de ganho para as defasagens estudadas é inferior a 2 dB em todos os casos. Assim, pode-se afirmar que tem-se um comportamento aceitável.

Figura 4.17 - Comportamento do diagrama de irradiação de ganho em 3D da rede linear uniforme de antenas impressas faixa larga com quatro elementos.



Fonte: O autor.

4.5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Com o resultado inicial da antena de microfita retangular proposta, observou-se uma faixa estreita de operação, o que já era esperado, em contrapartida a rede 5G exige antenas com maiores larguras de banda. Por estas razões foram necessárias modificações na geometria original da antena de microfita, isto levou, ao estudo de técnicas para aumentar a largura de banda desta antena.

Todas as etapas de projeto e construção foram validadas em ambiente computacional, garantindo o modelo proposto nesse trabalho. A configuração proposta para utilização das antenas aqui que foram projetadas aqui, e uma rede linear de antenas de microfita com banda ultra larga, com dois ou quatro elementos, que são definidos de acordo com os equipamentos a serem utilizados por um provedor da rede 5G.

Analisando os resultados obtidos das simulações, e visto que o objetivo principal do trabalho, foi cumprido ao observa-se o funcionamento do *beamforming*. Além disso através de determinadas técnicas, foi possível criar uma antena de microfita com banda larga que é aplicável ao 5G. Com os resultados obtidos, as antenas propostas aqui são viáveis para recente rede 5G, e fortes candidatas a serem utilizadas.

4.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo, apresentou-se os resultados dos modelos de antenas propostos no trabalho. Para tal, tendo como base parâmetros de impedância e irradiação, demonstrou-se de forma detalhada vários estudos que culminaram para validar o projeto proposto.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÃO, CONTRIBUIÇÃO E TRABALHOS FUTUROS

Neste capítulo são apresentadas as conclusões, contribuições e possíveis trabalhos futuros que podem ser gerados a partir desse trabalho.

5.1 CONCLUSÕES

Esse trabalho de conclusão de curso apresentou o projeto de uma rede de antenas com capacidade de prover *beamforming* em redes celulares 5G operando na banda de 3,3GHz à 3,8GHz. Todavia, além do projeto proposto, destaca-se como uma importante contribuição desse trabalho a demonstração de uma metodologia que pode ser aplicada ao desenvolvimento dessa mesma estrutura em outras condições (outras faixas de frequência e/ou materiais).

No Capítulo 1 apresentou-se os conceitos introdutórios, onde foram descritas características do 5G e importância de antenas com capacidade de prover *beamforming*. Dessa forma, mostrou-se as motivações e possíveis seguimentos de contribuição para redes celulares 5G.

No Capítulo 2 foram discutidos os conceitos teóricos necessários para projetar a antena proposta. Primeiramente, foram levantados os equacionamentos de antenas de microfita retangulares alimentadas por linhas de microfita. Em seguida, apresentou-se as modificações necessárias para tornar uma microfita retangular faixa larga. Por fim, descreveu-se como projetar uma rede linear uniforme de antenas de microfita faixa larga, destacando como prover *beamforming* com essa estrutura.

No Capítulo 3 foi demonstrada a metodologia e os recursos necessários para a realização desse trabalho. Mostrou-se, o passo a passo para o projeto, bem como quais as métricas utilizadas nas análises. Além disso, apresentou-se a ferramenta computacional utilizado no projeto e análise da estrutura proposta.

No Capítulo 4 foram apresentados os principais resultados do projeto, tendo como objetivo mostrar cada etapa de forma didática. Nesse capítulo, a partir dos estudos propostos,

mostrou-se que a antena proposta possui banda suficiente para operar de 3,3 GHz à 3,8 GHz, com ganho podendo ser superior à 10 dBi na direção de máxima irradiação e capacidade de prover *beamforming* de modo simples e objetivo.

Como nos estudos e nos resultados do trabalho aqui proposto, acredita-se ter relevantes contribuições para as pesquisas de antenas que podem ser implementadas em uma rede 5G. Assim, conclui-se que os objetivos desse trabalho foram alcançados.

5.2 PROPOSTAS PARA A CONTINUAÇÃO DO TRABALHO

Como continuação desse trabalho propõe-se, a partir da versão completa do simulador, projetar uma rede com mais elementos com o objetivo de alcançar um valor ainda mais elevado de ganho. Além disso, a partir da metodologia apresentada, sugere-se o projeto dessa estrutura para outras faixas do 5G, como por exemplo à de 26GHz. É importante destacar que utilizando esta metodologia, é possível projetar antenas para outras frequências de operação

Também é válido destacar a confecção das antenas propostas. Sendo assim possível realizar uma comparação dos resultados que foram obtidos em um ambiente de simulação e no ambiente real.

REFERÊNCIAS

- [1] A. Ghosh, A. Maeder, M. Baker and D. Chandramouli, “5G Evolution: A View on 5G Cellular Technology Beyond 3GPP Release 15,” in *IEEE Access*, vol. 7, pp. 127639-127651, 2019.
- [2] 3GPP “*3rd Generation Partnership Project*”. Disponível em: <https://www.3gpp.org/>. Acesso em: 27, jul. 2022.
- [3] ITU “*International Telecommunication Union*”. Disponível em: <https://www.itu.int/>. Acesso em: 27, jul. 2022.
- [4] G. Liu, Y. Huang, Z. Chen, L. Liu, Q. Wang and N. Li, “5G Deployment: Standalone vs. Non-Standalone from the Operator Perspective,” in *IEEE Communications Magazine*, vol. 58, no. 11, pp. 83-89, November 2020.
- [5] Release 15 “*Procedures for the 5G System*”. Disponível em: <https://www.3gpp.org/release-15>. Acesso em: 27, jul. 2022.
- [6] Release 16 “*Procedures for the 5G System (5GS)*”. Disponível em: <https://www.3gpp.org/release-16>. Acesso em: 27, jul. 2022.
- [7] IMT-2020 and 5G “*5G Basics*”. Disponível em: <https://www.itu.int/pub/T-TUT-IMT>. Acesso em: 27, jul. 2022.
- [8] Release 17. Disponível em: <https://www.3gpp.org/release-17>. Acesso em: 27, jul. 2022.
- [9] Release 18. Disponível em: <https://www.3gpp.org/release18>. Acesso em: 27, jul. 2022
- [10] 3GPP, “Study on New Radio (NR) access technology”, 2020.
- [11] L. L. Mendes et al., “Enhanced Remote Areas Communications: The Missing Scenario for 5G and Beyond 5G Networks,” in *IEEE Access*, vol. 8, pp. 219859-219880, 2020.
- [12] S. Ahmadi, “5G NR: architecture, technology, implementation, and operation of 3GPP new radio standards,” *Academic Press*, 1st Ed., 2019.

- [13] GOV-BR: Resolução nº 742, de 01 de março de 2021. Disponível em: <https://informacoes.anatel.gov.br/legislacao/resolucoes/2021/1512-resolucao-742>. Acesso em: 26 jul. 2022.
- [14] S. Henry, A. Alsohaily and E. S. Sousa, “5G is Real: Evaluating the Compliance of the 3GPP 5G New Radio System With the ITU IMT-2020 Requirements,” in *IEEE Access*, vol. 8, pp. 42828-42840, 2020.
- [15] C. E. Shannon, “A mathematical theory of communication,” in *The Bell System Technical Journal*, vol. 27, no. 3, pp. 379-423, July 1948.
- [16] J. Wang et al., “Wideband Dipole Array Loaded Substrate Integrated H-Plane Horn Antenna for Millimeter Waves,” in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 65, no. 10, pp. 5211-5219, Oct. 2017.
- [17] Y. Li, Z. Zhao, Z. Tang and Y. Yin, “Differentially-Fed, Wideband Dual-Polarized Filtering Antenna With Novel Feeding Structure for 5G Sub-6 GHz Base Station Applications,” in *IEEE Access*, vol. 7, pp. 184718-184725, 2019.
- [18] M. Ciydem and E. A. Miran, “Dual-Polarization Wideband Sub-6 GHz Suspended Patch Antenna for 5G Base Station,” in *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 19, no. 7, pp. 1142-1146, July 2020.
- [19] X. -T. Yuan, Z. Chen, T. Gu and T. Yuan, “A Wideband PIFA-Pair-Based MIMO Antenna for 5G Smartphones,” in *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 20, no. 3, pp. 371-375, March 2021.
- [20] K. -L. Wong and G. -L. Yan, “Wideband Three-Port Equilateral Triangular Patch Antenna Generating Three Uncorrelated Waves for 5G MIMO Access Points,” in *IEEE Access*, vol. 10, pp. 893-899, 2022.
- [21] S. X. Ta, H. Choo and I. Park, “Broadband Printed-Dipole Antenna and Its Arrays for 5G Applications,” in *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 16, pp. 2183-2186, 2017.
- [22] P. I. Bantavis, C. I. Kolitsidas, T. Empliouk, M. Le Roy, B. L. G. Jonsson and G. A. Kyriacou, “A Cost-Effective Wideband Switched Beam Antenna System for a Small Cell Base Station,” in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 66, no. 12, pp. 6851-6861, Dec. 2018.

- [23] M. Ansari, H. Zhu, N. Shariati and Y. J. Guo, “Compact Planar Beamforming Array With Endfire Radiating Elements for 5G Applications,” in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 67, no. 11, pp. 6859-6869, Nov. 2019.
- [24] R. Lu, C. Yu, Y. Zhu and W. Hong, “Compact Millimeter-Wave Endfire Dual-Polarized Antenna Array for Low-Cost Multibeam Applications,” in *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 19, no. 12, pp. 2526-2530, Dec. 2020.
- [25] G. Yang, Y. Zhang and S. Zhang, “Wide-Band and Wide-Angle Scanning Phased Array Antenna for Mobile Communication System,” in *IEEE Open Journal of Antennas and Propagation*, vol. 2, pp. 203-212, 2021.
- [26] R. dos Santos, A. M. Muniz, M. Borsato, T. H. Brandão, T. N. Rodovalho and S. A. Cerqueira, “Multi-technology wireless coverage based on a leaky-wave reconfigurable antenna,” *2017 11th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP)*, pp. 2824-2828, March 2017.
- [27] J. A. J. Ribeiro, Engenharia de antenas: fundamentos, projetos e aplicações, Érica, 2012.
- [28] C. A. Balanis, Antenna theory: analysis and design, 3rd ed., John Wiley and Sons, Nova York, 2005.
- [29] R. A. Santos, Antenas em lente aplicadas em tecnologias que visam altas taxas de transmissão. Tese de Doutorado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Itajubá. Itajubá - MG, 2019.
- [30] G. P. Rezende, Arranjo linear de antenas impressas faixa larga com diagrama de irradiação reconfigurável em função da frequência para aplicações em 4G e 5G. Trabalho de Conclusão de Curso – Graduação em Engenharia Eletrônica e de Telecomunicações da Universidade Federal de Uberlândia. Patos de Minas - MG, 2022.
- [31] Ansys Electronics Desktop Student. Disponível em: <https://www.ansys.com/academic/students/ansys-electronics-desktop-student>. Acesso em: 23 aug. 2022.
- [32] Rogers Corporation. Disponível em: <https://www.rogerscorp.com/advanced-electronics-solutions/rt-duroid-laminates/rt-duroid-5880-laminates>. Acesso em: 11 out. 2022.