

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA**

FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA

ENGENHARIA ELETRÔNICA E DE TELECOMUNICAÇÕES

CAMPUS PATOS DE MINAS

**GUILHERME RODRIGUES SANTOS**

**ANTENA DE MICROFITA COM FENDA EM U DE BANDA LARGA E  
POLARIZAÇÃO CIRCULAR PARA REDES DE CELULARES 5G**

Patos de Minas - MG  
2024

**GUILHERME RODRIGUES SANTOS**

**ANTENA DE MICROFITA COM FENDA EM U DE BANDA LARGA E  
POLARIZAÇÃO CIRCULAR PARA REDES DE CELULARES 5G**

Projeto Final de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia, como pré-requisito para a graduação em Engenharia Eletrônica e de Telecomunicações.

Orientador: Dr. Renan Alves dos Santos

Patos de Minas – MG  
2024

# AGRADECIMENTOS

---

Agradeço à Deus, por todas as oportunidades que tive durante minha vida, por minha saúde e pelo apreço que adquiri pela educação.

Agradeço aos meus pais por me apoiarem e incentivarem durante todo o tempo que estive estudando.

Agradeço meu orientador pelo apoio e dedicação, essencial para junto concluirmos este trabalho.

Aos professores pela excelente qualidade de ensino e atenção com os discentes.

Agradeço também à Universidade Federal de Uberlândia por proporcionar acesso à educação e assistência para progredir com os estudos.

# RESUMO

---

---

Este projeto final de curso tem como objetivo o projeto de uma antena de microfita quadrada com fenda no formato de U assimétrico inserida no elemento ressonador. Tal geometria é responsável por apresentar polarização circular em largura de faixa larga. Assim, pode ser vista como elemento potencial em aplicações que requerem alta confiabilidade, como as redes de comunicação móvel de quinta geração (5G). Desse modo, o projeto foi desenvolvido para operar na faixa de frequências no entorno de 3,5GHz padronizada pela Agência Nacional de Telecomunicações (Anatel). O projeto foi realizado a partir de análises numéricas no simulador Ansys Electronics Desktop, alcançando largura de banda de aproximadamente 15% e na direção de máxima irradiação chegando à 7,9dBi.

**Palavras-chave:** 5G, Antena de microfita, Banda larga, Polarização circular.

# ABSTRACT

---

---

This Final paper aims to design a square microstrip antenna with an asymmetric U-shaped slot inserted into the patch. This geometry is responsible for presenting wideband circular polarization. Thus, it can be seen as a potential element in applications that require high reliability, such as fifth generation mobile communication networks (5G). Therefore, the design was developed to operate in the frequency band around 3.5GHz standardized by the National Telecommunications Agency (Anatel). The design was carried out based on numerical analysis in the Ansys Electronics Desktop simulator, reaching a bandwidth of approximately 15% and in the direction of maximum radiation reaching 7.9dBi.

**Keywords:** 5G, Microstrip patch antenna, Wideband, Circular polarization.

# LISTA DE FIGURAS

---

---

Figura 1.1 - Ilustração da polarização da onda eletromagnética.....	15
Figura 2.1 - Ilustração da antena de microfita com fenda no formato de U assimétrico inserida no elemento ressonador para operação banda larga com polarização circular apresenta em [10].....	22
Figura 2.2 - Ilustração do conceito de operação em polarização circular de banda larga de modo triplo.....	25
Figura 2.3 - Respostas de em frequência dos parâmetros de casamento de impedância e irradiação da antena apresentada em [10].....	27
Figura 2.4 - Diagramas de irradiação de ganho realizável da antena apresentada em [10] na frequência de 5,5GHz.....	29
Figura 4.1 - Respostas de em frequência dos parâmetros de casamento de impedância e irradiação do modelo inicial da antena reprojeta para a faixa de 3,5GHz.....	34
Figura 4.2 - Estudo do impacto das variáveis $l_p$ e $w_p$ na faixa de frequência de operação da antena proposta.....	36
Figura 4.3 - Estudo do impacto da variável $a$ na faixa de frequência de operação da antena proposta.....	37
Figura 4.4 - Estudo do impacto da variável $b$ na faixa de frequência de operação da antena proposta.....	38
Figura 4.5 - Estudo do impacto da variável $c$ na faixa de frequência de operação da antena proposta.....	40
Figura 4.6 - Estudo do impacto da variável $d$ na faixa de frequência de operação da antena proposta.....	41
Figura 4.7 - Estudo do impacto da variável $u$ na faixa de frequência de operação da antena proposta.....	42
Figura 4.8 - Estudo do impacto da variável $h$ na faixa de frequência de operação da antena proposta.....	44
Figura 4.9 - Estudo do impacto das variáveis $l_g$ e $w_g$ na faixa de frequência de operação da antena proposta com $h \cong 0,456l_p$ .....	45
Figura 4.10 - Estudo do impacto das variáveis $l_g$ e $w_g$ na faixa de frequência de operação da antena proposta com $h \cong 0,477l_p$ .....	46
Figura 4.11 - Estudo do impacto das variáveis $l_s$ e $w_s$ na faixa de frequência de operação da antena proposta com $h \cong 0,456l_p$ e $l_g = w_g \cong 4,7l_p$ .....	47

Figura 4.12 - Estudo do impacto das variáveis $l_s$ e $w_s$ na faixa de frequência de operação da antena proposta com $h \cong 0,477l_p$ e $l_g = w_g \cong 4,9l_p$ .....	48
Figura 4.13 - Estudo do impacto das variáveis $x_f$ na faixa de frequência de operação da antena proposta com $h \cong 0,456l_p$ , $l_g = w_g \cong 4,7l_p$ e $l_s = w_s \cong 2,1l_p$ .....	50
Figura 4.14 - Estudo do impacto das variáveis $x_f$ na faixa de frequência de operação da antena proposta com $h \cong 0,456l_p$ , $l_g = w_g \cong 4,7l_p$ e $l_s = w_s \cong 2,2l_p$ .....	51
Figura 4.15 - Estudo do impacto das variáveis $y_f$ na faixa de frequência de operação da antena proposta com $h \cong 0,456l_p$ , $l_g = w_g \cong 4,7l_p$ e $l_s = w_s \cong 2,1l_p$ .....	52
Figura 4.16 - Estudo do impacto das variáveis $y_f$ na faixa de frequência de operação da antena proposta com $h \cong 0,456l_p$ , $l_g = w_g \cong 4,7l_p$ e $l_s = w_s \cong 2,2l_p$ .....	53
Figura 4.17 - Respostas de em frequência dos parâmetros de casamento de impedância e irradiação do modelo final da antena reprojeta para a faixa de 3,5GHz.....	54
Figura 4.18 - Diagramas de irradiação de ganho realizável do modelo final da antena proposta na frequência de 3,5 GHz.....	55

# LISTA DE TABELAS

---

---

Tabela 1.1: Subfaixas para o 5G do espectro situado entre 3,3GHz até 3,8GHz [3] .....	12
Tabela 1.2: Subfaixas para o 5G do espectro situado entre 24,25GHz até 27,90GHz [3] .....	13
Tabela 4.1: Bandas percentuais de operação do estudo da variável $l_p$ e $w_p$ .....	36
Tabela 4.2: Bandas percentuais de operação do estudo da variável a .....	37
Tabela 4.3: Bandas percentuais de operação do estudo da variável b .....	39
Tabela 4.4: Bandas percentuais de operação do estudo da variável c .....	40
Tabela 4.5: Bandas percentuais de operação do estudo da variável d .....	42
Tabela 4.6: Bandas percentuais de operação do estudo da variável u .....	43
Tabela 4.7: Bandas percentuais de operação do estudo da variável h .....	44
Tabela 4.8: Bandas percentuais de operação do estudo das variáveis $l_g$ e $w_g$ .....	46
Tabela 4.9: Bandas percentuais de operação do estudo das variáveis $l_s$ e $w_s$ .....	49
Tabela 4.10: Bandas percentuais de operação do estudo da variável $x_f$ .....	50
Tabela 4.11: Bandas percentuais de operação do estudo da variável $y_f$ .....	52
Tabela 4.12: Todas as configurações finais que atendem a banda .....	53

# LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

---

---

<b>3GPP</b>	Generation Partnership Project Two-Dimensional
<b>5G</b>	Redes celulares de quinta geração
<b>Anatel</b>	Agência Nacional de Telecomunicações
<b>AR</b>	Razão Axial
<b>CMA</b>	Análise de modo característico
<b>dB</b>	Decibel
<b>dB<sub>i</sub></b>	Decibel isotrópico equivalente
<b>eMBB</b>	Enhanced Mobile Broadband
<b>f<sub>cp</sub></b>	Frequência de polarização circular
<b>URLLC</b>	Ultra Reliable Low Latency Communications
<b>FR</b>	Frequency Range
<b>HFSS</b>	High Frequency Structure Simulator
<b>Hz</b>	Hertz
<b>IMT</b>	International Mobile Telecommunications
<b>IoT</b>	Internet das coisas
<b>ITU</b>	International Telecommunication Union
<b>LHCP</b>	Polarização circular à esquerda
<b>mMTC</b>	Massive Machine Type Communication
<b>MS</b>	Significância modal
<b>RHCP</b>	Polarização circular à direita
<b>SMA</b>	SubMiniature version A
<b>URLLC</b>	Ultra Reliable Low Latency

# SUMÁRIO

<b>AGRADECIMENTOS</b> .....	<b>12</b>
<b>RESUMO</b> .....	<b>13</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>14</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	<b>15</b>
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	<b>17</b>
<b>LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS</b> .....	<b>18</b>
<b>CONCEITOS INTRODUTÓRIOS</b> .....	<b>10</b>
1.1 Introdução.....	10
1.2 Problematização.....	14
1.3 Tema do projeto.....	17
1.4 Objetivos.....	19
1.3.1 Objetivos gerais .....	19
1.3.2 Objetivos específicos.....	19
1.5 Justificativas .....	20
1.6 Considerações finais .....	20
<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	<b>21</b>
2.1 Considerações iniciais .....	21
2.2 Teoria do modo característico .....	22
2.3 Operação em polarização circular de banda larga de modo triplo .....	24
2.4 Antena de microfita com operação em polarização circular de banda larga .....	25
2.5 Considerações finais .....	29
<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>30</b>
3.1 Considerações iniciais .....	30
3.2 Metodologia de desenvolvimento.....	30
3.3 Recursos necessários .....	31
3.4 Considerações finais .....	32
<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>33</b>
4.1 Considerações iniciais .....	33
4.2 Reprojetado da antena para a faixa de 3,5GHz .....	33
4.2.1 Estudo das variáveis $l_p$ e $w_p$ .....	35

4.2.2	Estudo da variável $a$ .....	36
4.2.3	Estudo da variável $b$ .....	38
4.2.4	Estudo da variável $c$ .....	39
4.2.5	Estudo da variável $d$ .....	40
4.2.6	Estudo da variável $u$ .....	42
4.2.7	Estudo da variável $h$ .....	43
4.2.8	Estudo das variáveis $l_g$ e $w_g$ .....	44
4.2.9	Estudo das variáveis $l_s$ e $w_s$ .....	47
4.2.10	Estudo da variável $x_f$ .....	49
4.2.11	Estudo da variável $y_f$ .....	51
4.3	Modelo final da antena reprojeta para a faixa de 3,5GHz .....	53
4.4	Considerações finais .....	56
<b>CONCLUSÕES, CONTRIBUIÇÕES E TRABALHOS FUTUROS.....</b>		<b>57</b>
5.1	Conclusões.....	57
5.2	Propostas para a continuação do trabalho.....	58
<b>REFERÊNCIAS .....</b>		<b>59</b>

# Capítulo 1

## CONCEITOS INTRODUTÓRIOS

---

### 1.1 Introdução

A sociedade moderna está em constante evolução e na busca pelas facilidades que a tecnologia lhe pode oferecer. O mundo aos poucos se moderniza, sendo a chave fundamental para isso a implementação dos novos sistemas de comunicação como, por exemplo as redes de comunicação móvel celular de quinta geração (5G) [1].

O 5G é visto como uma quebra de paradigmas nas telecomunicações, envolvendo desde comunicações de altíssima velocidade até sistemas autônomos inteligentes [2]. Estes sistemas serão capazes de aprimorar tanto a velocidade de conexão na internet de usuário comum, como também mudar totalmente a dinâmica de diversos segmentos (como indústrias, cidades e campo) com aplicações de Internet das Coisas (IoT do inglês *Internet of Things*). Assim, o 5G é um conceito que afetará a vida do ser humano, não importa a localidade geográfica em que esteja.

Para tornar o 5G uma realidade, países no mundo todo tem realizado investimentos em pesquisa e desenvolvimento de novos dispositivos e sistemas para adequarem sua infraestrutura para o novo padrão de comunicação móvel. Além desses investimentos, conjuntamente com órgãos internacionais responsáveis, as agências regulatórias dos governos também têm buscado estabelecer padrões e regulamentações para as novas redes. Nesse contexto, um importante documento elaborado é o relatório denominado Telecomunicações Móveis Internacionais - 2020 (IMT-2020 do inglês *International Mobile Telecommunications*), que estabeleceu regras para a implementação das redes 5G, publicado em 2020 pela União Internacional de Telecomunicações (ITU do inglês *International Telecommunication Union*) [2]. No IMT-2020 foram definidos três cenários de uso principais para essa tecnologia, sendo eles:

(a) Banda Larga Móvel Aprimorada (eMBB do inglês *Enhanced Mobile Broadband*): esse cenário se concentra em oferecer maiores larguras de banda e velocidades de dados para dispositivos móveis, permitindo uma melhor experiência do usuário em termos de *streaming* de vídeo, jogos *online*, *download/upload* de arquivos, entre outros.

(b) Comunicações Ultra confiáveis e de Baixa Latência (URLLC do inglês *Ultra Reliable Low Latency*): esse cenário se concentra em fornecer conexões extremamente confiáveis e de baixa latência para suportar aplicações críticas em tempo real, como veículos autônomos, automação industrial, cirurgias remotas, entre outros. Isso significa que a tecnologia deve ser capaz de transmitir dados rapidamente e sem falhas (ou com o mínimo possível), permitindo que essas aplicações funcionem de forma segura e eficiente.

(c) Comunicações Massivas do Tipo Máquina (mMTC do inglês *Massive Machine Type Communication*): esse cenário se concentra em fornecer conectividade para muitos dispositivos de baixa potência e baixa complexidade, como sensores IoT, medidores inteligentes, entre outros. Isso significa que a tecnologia deve ser capaz de suportar uma grande quantidade de dispositivos simultaneamente, com baixo consumo de energia e custo reduzido por dispositivo.

Outro fator de extrema importância no 5G (como em qualquer tecnologia) é a padronização das frequências de operação. Para tal, foi definida pela ITU, a partir de estudos apresentados pelo Projeto de Parceria de 3ª Geração (3GPP do inglês *3<sup>rd</sup> Generation Partnership Project*) que as faixas de frequência do 5G sejam divididas em duas [2]: a primeira faixa (FR1 do inglês *Frequency Range 1*) de 410MHz a 7125MHz e a segunda (FR2 do inglês *Frequency Range 2*) de 24,25GHz a 52,60GHz. Essas faixas de frequência foram escolhidas com base em uma série de fatores, incluindo a disponibilidade de espectro, a capacidade de penetração em edifícios e a capacidade de transmissão de dados em alta velocidade. A escolha dessas faixas de frequência é importante porque define as características e limitações das redes 5G, além de permitir que os dispositivos sejam compatíveis com as redes em todo o mundo.

No Brasil, cabe à Agência Nacional de Telecomunicações (Anatel) regulamentar a utilização eficiente do espectro [3]. Para o 5G, a Anatel definiu duas faixas principais de frequência: a faixa de 3,3GHz a 3,8GHz e a faixa de 24,25 GHz a 27,90 GHz. Cada uma dessas faixas foi subdividida em blocos. Esses blocos foram leiloados para as operadoras interessadas em 2021, e a ideia é que a divisão em blocos permita um uso mais eficiente do espectro, evitando interferências entre as operadoras e garantindo a qualidade dos serviços prestados. Os blocos são apresentados nas Tabelas 1.1 e 1.2.

A implantação do 5G no Brasil está em andamento, mas o processo pode variar em diferentes regiões do país. As primeiras áreas urbanas e centros metropolitanos são geralmente priorizados, enquanto áreas mais remotas podem levar mais tempo para ter cobertura total. A implementação depende das estratégias das operadoras e do ritmo das infraestruturas locais.

**Tabela 1.1: Subfaixas para o 5G do espectro situado entre 3,3GHz até 3,8GHz [3].**

<b>Bloco</b>	<b>Subfaixa (MHz)</b>	<b>Bloco</b>	<b>Subfaixa</b>
1	3300 a 3310	26	3550 a 3560
2	3310 a 3320	27	3560 a 3570
3	3320 a 3330	28	3570 a 3580
4	3330 a 3340	29	3580 a 3590
5	3340 a 3350	30	3590 a 3600
6	3350 a 3360	31	3600 a 3610
7	3360 a 3370	32	3610 a 3620
8	3370 a 3380	33	3620 a 3630
9	3380 a 3390	34	3630 a 3640
10	3390 a 3400	35	3640 a 3650
11	3400 a 3410	36	3650 a 3660
12	3410 a 3420	37	3660 a 3670
13	3420 a 3430	38	3670 a 3680
14	3430 a 3440	39	3680 a 3690
15	3440 a 3450	40	3690 a 3700
16	3450 a 3460	41	3700 a 3710
17	3460 a 3470	42	3710 a 3720
18	3470 a 3480	43	3720 a 3730
19	3480 a 3490	44	3730 a 3740
20	3490 a 3500	45	3740 a 3750
21	3500 a 3510	46	3750 a 3760
22	3510 a 3520	47	3760 a 3770
23	3520 a 3530	48	3770 a 3780
24	3530 a 3540	49	3780 a 3790
25	3540 a 3550	50	3790 a 3800

As regulamentações da Anatel abrangem questões como atribuição de espectro, requisitos técnicos para implantação, padrões para garantir a interoperabilidade entre diferentes redes 5G e diretrizes para a instalação de infraestrutura. Essas regulamentações são especificadas para promover o desenvolvimento eficiente e seguro das redes 5G no Brasil. É importante destacar que a regulamentação da Anatel normalmente inclui diretrizes sobre [3]:

(a) Lance e aquisição: Estabelece as regras para as operadoras participarem dos leilões, incluindo as condições financeiras, requisitos técnicos e outros critérios.

(b) Licenciamento e uso: Define como as operadoras licenciadas podem utilizar os blocos de frequência adquiridos, especificando padrões técnicos e limitações operacionais.

(c) Cronograma de implementação: Pode incluir requisitos para as operadoras implementarem a infraestrutura e disponibilizarem os serviços 5G em determinadas áreas e prazos.

(d) Obrigações de cobertura: Pode incluir requisitos para as operadoras garantirem cobertura em áreas específicas, visando atingir metas de universalização e inclusão digital.

(d) Interoperabilidade: Estabelece padrões para garantir que as redes 5G sejam interoperáveis, permitindo a comunicação eficiente entre diferentes operadoras e dispositivos.

**Tabela 1.2: Subfaixas para o 5G do espectro situado entre 24,25GHz até 27,90GHz [3].**

<b>Bloco</b>	<b>Subfaixa (GHz)</b>	<b>Bloco</b>	<b>Subfaixa (GHz)</b>	<b>Bloco</b>	<b>Subfaixa (GHz)</b>
1	24,25 a 24,30	26	25,50 a 25,55	51	26,75 a 26,80
2	24,30 a 24,35	27	25,55 a 25,60	52	26,80 a 26,85
3	24,35 a 24,40	28	25,60 a 25,65	53	26,85 a 26,90
4	24,40 a 24,45	29	25,65 a 25,70	54	26,90 a 26,95
5	24,45 a 24,50	30	25,70 a 25,75	55	26,95 a 27,00
6	24,50 a 24,55	31	25,75 a 25,80	56	27,00 a 27,05
7	24,55 a 24,60	32	25,80 a 25,85	57	27,05 a 27,10
8	24,60 a 24,65	33	25,85 a 25,90	58	27,10 a 27,15
9	24,65 a 24,70	34	25,90 a 25,95	59	27,15 a 27,20
10	24,70 a 24,75	35	25,95 a 26,00	60	27,20 a 27,25
11	24,75 a 24,80	36	26,00 a 26,05	61	27,25 a 27,30
12	24,80 a 24,85	37	26,05 a 26,10	62	27,30 a 27,35
13	24,85 a 24,90	38	26,10 a 26,15	63	27,35 a 27,40
14	24,90 a 24,95	39	26,15 a 26,20	64	27,40 a 27,45
15	24,95 a 25,00	40	26,20 a 26,25	65	27,45 a 27,50
16	25,00 a 25,05	41	26,25 a 26,30	66	27,50 a 27,55
17	25,05 a 25,10	42	26,30 a 26,35	67	27,55 a 27,60
18	25,10 a 25,15	43	26,35 a 26,40	68	27,60 a 27,65
19	25,15 a 25,20	44	26,40 a 26,45	69	27,65 a 27,70
20	25,20 a 25,25	45	26,45 a 26,50	70	27,70 a 27,75
21	25,25 a 25,30	46	26,50 a 26,55	71	27,75 a 27,80
22	25,30 a 25,35	47	26,55 a 26,60	72	27,80 a 27,85
23	25,35 a 25,40	48	26,60 a 26,65	73	27,85 a 27,90
24	25,40 a 25,45	49	26,65 a 26,70		
25	25,45 a 25,50	50	26,70 a 26,75		

## 1.2 Problematização

O projeto de um dispositivo ou sistema de telecomunicações para operar em uma rede 5G depende de vários fatores, incluindo a alocação da subfaixa (ou blocos) e o cenário de uso. Cada subfaixa tem suas características e limitações, o que pode afetar o desempenho do dispositivo ou sistema. Por exemplo, em frequências mais altas pode-se ter maior largura de banda (devido à disponibilidade de espectro), o que permite maiores taxas de transferência de dados, porém, têm menor alcance, visto que apresentam valores mais elevados de atenuação. Além disso, o cenário em que o dispositivo ou sistema irá operar também afeta o projeto. Cada cenário tem requisitos diferentes em termos de capacidade, cobertura, densidade de usuários, confiabilidade, latência, entre outros aspectos. Portanto, é importante considerar cuidadosamente a subfaixa alocada e o cenário em que o dispositivo ou sistema irá operar para garantir um desempenho ideal em uma rede 5G.

Dentre os dispositivos que podem operar nas redes 5G, as antenas são um elemento que carece de atenção especial. As antenas são responsáveis por transmitir e receber os sinais de rádio que possibilitam a comunicação entre os dispositivos. Desse modo devem apresentar as características requeridas a subfaixa alocada e o cenário de uso.

Uma das características de antenas (principalmente em cenários de alta confiabilidade) que tem sido muito importante nas redes 5G é a polarização circular [4]. Antenas com polarização circular podem ser utilizadas para melhorar a qualidade de comunicação e a cobertura do sinal [5]. As antenas com polarização circular são menos suscetíveis à interferência de outras antenas e podem ajudar a reduzir os efeitos de desvanecimento do sinal, que podem ocorrer quando um sinal é bloqueado ou refletido por obstáculos físicos. Em resumo, as antenas com polarização circular podem ser uma opção interessante para melhorar a qualidade de comunicação e a cobertura do sinal em redes 5G.

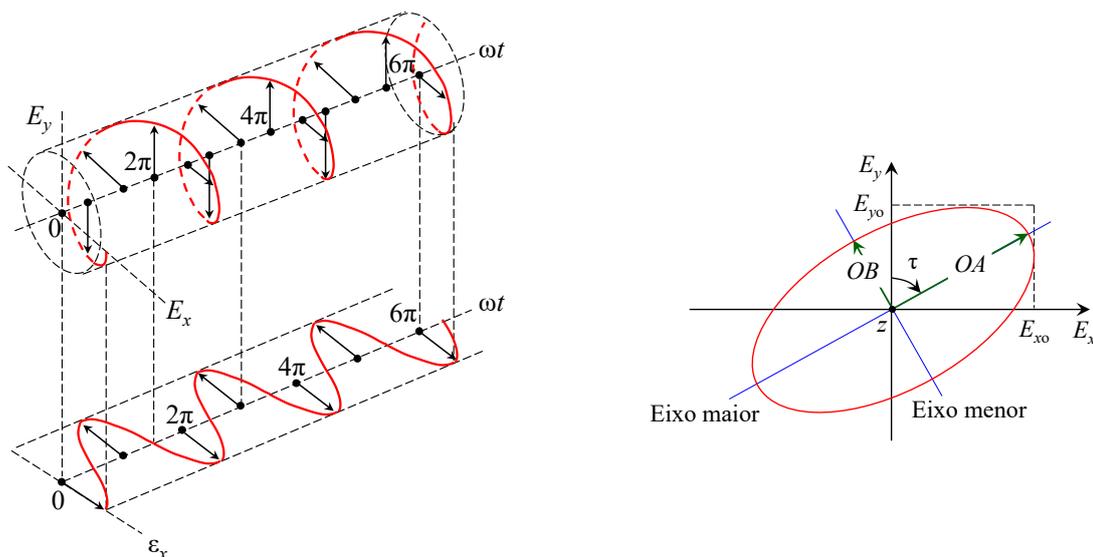
Para melhor apresentar a polarização circular, primeiramente é necessário discorrer sobre polarização de uma antena. A polarização de uma antena é a orientação espacial do campo elétrico da onda eletromagnética que é transmitida (ou recebida) pela antena (ver na Figura 1.1(a)) [5]. A polarização das antenas pode ser dividida em:

(a) Linear: Uma onda harmônica no tempo é polarizada linearmente, em um determinado ponto no espaço, se o vetor campo elétrico nesse ponto estiver sempre orientado ao longo da mesma linha reta a cada instante de tempo. Isso ocorre quando há apenas uma direção de campo elétrico (ou podendo ter duas, de diferentes amplitudes, desde que a diferença de fase entre elas seja  $\Delta\phi = n\pi$ , onde  $n = 0,1,2,3\dots$ ).

(b) Circular: Uma onda harmônica no tempo é polarizada circularmente, em um determinado ponto do espaço, se o vetor campo elétrico naquele ponto traçar um círculo em função do tempo. Isso ocorre apenas quando as magnitudes das duas componentes são iguais e a diferença de fase temporal entre elas são múltiplos ímpares de  $\pi/2$ , ou seja,  $\Delta\phi = n\pi/2$ , onde  $n = 1,3,5\dots$

(c) Elíptica: Uma onda harmônica de tempo é elípticamente polarizada, em um determinado ponto do espaço, se o vetor campo elétrico naquele ponto traçar um lugar geométrico elíptico. A polarização elíptica pode ser vista como um caso geral da polarização de uma onda eletromagnética. Ou seja, uma onda tem polarização elíptica para todos os valores de diferença de fase e amplitude que não atendem os critérios de polarização linear ou circular.

Figura 1.1 - Ilustração da polarização da onda eletromagnética.



(a) Orientação espacial do campo elétrico harmônico no tempo com polarização circular.

(b) Observação instantânea do campo elétrico de uma onda com polarização elíptica.

Fonte: adaptado de (5).

A polarização elíptica pode ser vista como o caso geral de todas as polarizações possíveis de uma onda eletromagnética [5]. Para exemplificar isso, pode-se representar a observação instantânea do campo elétrico de uma onda com polarização elíptica (ver na Figura 1.1(b)). Define-se  $OA$  e  $OB$  como, respectivamente, os eixos maior e menor da elipse. A relação entre  $OA$  e  $OB$  é definida como razão axial:

$$AR = \frac{OA}{OB}, \quad (1.1)$$

onde em escala linear tem-se  $1 \leq AR \leq \infty$  e em escala logarítmica  $0\text{dB} \leq AR \leq \infty\text{dB}$ . A partir de análises trigonométricas pode-se escrever  $OA$  e  $OB$  como:

$$OA = \sqrt{\frac{1}{2} \left( E_{x_0}^2 + E_{y_0}^2 + \sqrt{E_{x_0}^4 + E_{y_0}^4 + 2E_{x_0}^2 E_{y_0}^2 \cos(2\Delta\phi)} \right)} \quad \text{e} \quad \text{(a)}$$

$$OB = \sqrt{\frac{1}{2} \left( E_{x_0}^2 + E_{y_0}^2 - \sqrt{E_{x_0}^4 + E_{y_0}^4 + 2E_{x_0}^2 E_{y_0}^2 \cos(2\Delta\phi)} \right)} \quad \text{(b)}$$

(1.2)

Então, a partir da Figura 1.1(b), considerando que  $E_y$  tem a orientação vertical e  $E_x$  a orientação horizontal, pode-se particularizar os valores de  $AR$  como sendo:

(a) Se o campo elétrico tiver apenas componente vertical ( $E_{y_0} \neq 0$  e  $E_{x_0} = 0$ ) e  $\Delta\phi = n\pi$ : conforme a Figura 1.1(b), tem-se  $OA = E_{y_0}$  e  $OB = 0$ , de modo que em escala linear  $AR \rightarrow \infty$ . Assim, conclui-se que quando  $AR \rightarrow \infty$  a polarização é linear e, nesse caso, linear vertical.

(b) Se o campo elétrico tiver apenas componente horizontal ( $E_{y_0} = 0$  e  $E_{x_0} \neq 0$ ) e  $\Delta\phi = n\pi$ : conforme a Figura 1.1(b), tem-se  $OA = E_{x_0}$  e  $OB = 0$ , de modo que  $AR \rightarrow \infty$ . Assim, conclui-se que quando  $AR \rightarrow \infty$  a polarização é linear e, nesse caso, linear horizontal.

(c) Se o campo elétrico tiver componentes horizontal e vertical ( $E_{y_0} \neq 0$  e  $E_{x_0} \neq 0$ ) e  $\Delta\phi = n\pi$ : conforme a Figura 1.1(b), tem-se  $OA = \sqrt{E_{x_0}^2 + E_{y_0}^2}$  e  $OB = 0$ , de modo que em escala linear  $AR \rightarrow \infty$ . Assim, conclui-se que quando  $AR \rightarrow \infty$  a polarização é linear e, nesse caso, linear inclinada.

(d) Se o campo elétrico tiver componentes horizontal e vertical com mesma amplitude ( $E_{y_0} = E_{x_0} \neq 0$ ) e  $\Delta\phi = n\pi/2$  (onde  $n = 1,3,5$ ): conforme a Figura 1.1(b), tem-se  $OA = E_{y_0} = E_{x_0}$  e  $OB = E_{y_0} = E_{x_0}$ , de modo que em escala linear  $AR \rightarrow 1$ . Assim, conclui-se que quando  $AR \rightarrow 1$  a polarização é perfeitamente circular.

(e) Quando a diferença de fase no tempo entre os dois componentes é múltipla ímpar de  $\pi/2$  e suas magnitudes não são iguais ou quando a diferença de fase no tempo entre os dois componentes não é múltipla inteira de  $\pi/2$ : conforme a Figura 1.1(b), tem-se  $OA$  e  $OB$  descritos pela equação (1.2), em que os valores vão depender de caso a caso. Desse modo tem-se em escala linear tem-se  $1 \leq AR \leq \infty$ . Assim, conclui-se que quando  $1 \leq AR \leq \infty$  a polarização é elíptica.

Na prática, é muito difícil se obter uma antena com polarização perfeitamente circular ( $AR = 1$  ou  $AR = 0\text{dB}$ ). Por isso, definiu-se sendo aceitável que se o comportamento elíptico for pequeno ( $AR = \leq 2$  ou  $AR \leq 3\text{dB}$ ) a polarização é dita circular (5). Assim, pode-se classificar

como banda em polarização circular de uma antena a faixa de frequências em que  $AR = \leq 2$  ou  $AR \leq 3\text{dB}$ .

Dada a importância de antenas com polarização circular para as redes celulares 5G, na literatura é possível encontrar diversos trabalhos relevantes sobre o tema. Esses trabalhos se concentram em projetar, modelar e analisar antenas com polarização circular, bem como em estudar o comportamento da polarização circular em diferentes cenários.

Algumas das áreas de pesquisa em antenas de polarização circular na rede 5G incluem:

- (a) Projeto de antenas de polarização circular e alto ganho para comunicações 5G [6].
- (b) Projeto de antenas de polarização circular de banda larga para comunicações 5G [7].
- (c) Modelagem e simulação de antenas de polarização circular em cenários de propagação de ondas eletromagnéticas [8].

### 1.3 Tema do projeto

Tendo em vista a importância de antenas com polarização circular para as redes celulares 5G, esse trabalho de conclusão de curso tem como objetivo realizar o projeto numérico, utilizando o programa de simulação Ansys Electronics Desktop [9], de uma antena com essa característica para operar em blocos da faixa de 3,5GHz (faixa padronizada para o 5G no Brasil). Para tal, tem-se como referência principal o trabalho apresentado em [10]. Nesse artigo tem-se uma antena de microfita quadrada em que é inserida uma fenda no formato de U assimétrico no ressonador para transformar a polarização (que tipicamente é linear para esse tipo de antenas) em circular. Além disso, uma das características mais importantes dessa antena é a capacidade de operar em faixa larga com polarização circular.

A antena de microfita com fenda no formato de U assimétrico inserida no elemento ressonador foi apresentada e analisada em importantes trabalhos ao longo dos últimos anos:

(a) Em 2007, K. -F. Tong e seus colaboradores [11] apresentaram uma antena de microfita quadrada com fenda em U e polarização circular. A fenda em U assimétrico é usada para gerar dois modos ortogonais, que combinados levam à polarização circular. Nesse trabalho um estudo paramétrico foi realizado para investigar os efeitos causados pelas variáveis que compõem à fenda U. Por fim, um modelo final foi apresentado, construído em um substrato com material próximo do ar (*foam*), em que a largura de banda de relação axial de 3dB da antena é de 4% e o ganho na direção de máxima irradiação chegou à 8dBi.

(b) Em 2012, Y. Chen e seus colaboradores [12] apresentaram uma análise do modo característico, com a finalidade de compreender a física de duas antenas microfita (uma com

fenda assimétrica no formato de U no elemento ressonador e outra com fenda assimétrica no formato de E no elemento ressonador) polarizadas circularmente. Os autores estudaram a posição de alimentação e as dimensões do elemento ressonador a partir de análises de modo característico, significância modal e ângulo característico. Por fim, um modelo final foi apresentado, construído em um substrato com material próximo do ar (*foam*), em que a largura de banda de relação axial de 3dB da antena é de 4,3% e o ganho na direção de máxima irradiação chegou à 5,9dBi.

(c) Em 2016, M. Khan e seus colaboradores [13] apresentaram a análise de modo característico de três técnicas de projeto empíricas para a antena de microfita com fenda em U simétrico no elemento ressonador. O estudo de modo característico é realizado para parâmetros críticos, como espessura elétrica do substrato, largura da fenda, raio da sonda e variações de localização de alimentação. Por fim, três modelos finais foram apresentados, construídos em substratos de FR4, em que o ganho na direção de máxima irradiação chegou à 5,0dBi. É importante destacar que nesse trabalho (principalmente devido à geométrica simétrica da fenda em U) a antena não apresenta polarização circular.

(d) Em 2019, J. J. Borchardt e seus colaboradores apresentaram [14] análises de modo característico para explicar o comportamento da impedância de uma geometria clássica de antena de microfita com fenda em U no elemento ressonador. Para tal, foi utilizada a teoria de modo acoplado e mostrado que os modos relevantes são modos acoplados em fase e anti-fase. Os autores fornecem um modelo de circuito equivalente para a antena, em que os valores dos elementos são extraídos dos dados das análises de modo característico e que demonstra explicitamente o acoplamento entre esses dois ressonadores. Além disso, é apresentada uma metodologia de projeto baseada na teoria do modo acoplado e orientada pelo modo característico que permite que geometrias da antena de microfita com fenda em U no elemento ressonador seja projetada de forma rápida e eficiente. É importante destacar que os autores não construíram protótipo e que o modelo em questão também não apresenta polarização circular.

(e) Em 2022, J. Zeng e seus colaboradores [10] apresentaram um método de projeto para duas antenas microfita (uma com fenda assimétrica no formato de U no elemento ressonador e outra com fenda assimétrica no formato de E no elemento ressonador) polarizadas circularmente. Para tal, é proposta a operação em modo triplo ortogonais para garantir aumento de largura de banda das antenas em polarização circular. Uma das principais contribuições desse trabalho é a apresentação de uma formulação matemática que permite o projeto dessas antenas. Para as duas estruturas, um modelo final foi apresentado, construído em um substrato com

Rogers AD250C, em que a largura de banda de relação axial de 3dB da antena é superior à 20% e o ganho na direção de máxima irradiação chegando à 7,4dBi.

Os trabalhos analisados sobre a antena de microfita com fenda no formato de U assimétrico inserida no elemento ressonador são base para o desenvolvimento desse trabalho. Entretanto, principalmente pela formulação matemática apresentada, o trabalho apresentado em (10) é visto como o principal, sendo este a ser seguido no tema desse projeto final de curso.

## **1.4 Objetivos**

O trabalho apresentado em (10) foi projetado para operar na faixa de frequências de 4,93GHz à 6,09GHz. Então, o objetivo desse projeto final de curso é reprojeter esse dispositivo para a operação centrada em 3,5GHz. Desse modo espera-se obter uma antena capaz de operar na faixa padronizada para o 5G no Brasil 3,3GHz à 3,8GHz (ou na maior parte dos blocos dessa faixa).

### **1.3.1 Objetivos gerais**

O objetivo geral deste trabalho é o projeto da antena de microfita com fenda no formato de U assimétrico inserida no elemento ressonador para operação banda larga com polarização circular. Desse modo, espera-se ter uma antena final capaz de operar na faixa padronizada para o 5G no Brasil de 3,3GHz à 3,8GHz.

### **1.3.2 Objetivos específicos**

Os objetivos específicos deste trabalho estão relacionados aos conceitos e metodologias necessárias para alcançar o objetivo geral do estudo. Assim, podem ser divididos em:

- (a) Estudar as características das redes 5G.
- (b) Estudar as técnicas de projeto da antena de microfita com fenda no formato de U assimétrico inserida no elemento ressonador apresentada em [10].
- (c) Aprender a usar o programa *Ansys Electronics Desktop* para executar o projeto numérico.
- (d) Reprojetar a antena de microfita banda larga com polarização circular apresentada em [11] no simulador *Ansys Electronics Desktop* para a faixa de frequências centrada em 3,5GHz.
- (e) Analisar parâmetros que atestem a eficácia do projeto, tendo como base:
  - i. Resposta em frequência do coeficiente de reflexão.
  - ii. Resposta em frequência da razão axial.

- iii. Resposta em frequência do ganho realizável.
- iv. Diagramas de irradiação de ganho realizável na direção de máxima irradiação.

## **1.5 Justificativas**

O 5G, ainda em fase de desenvolvimento e implementação no Brasil, assim como em diversas partes do mundo, apresenta diversos campos de trabalho. Um que desperta importante atenção é o projeto de dispositivos como antenas, principalmente com polarização circular. Assim, esse trabalho visa contribuir com os projetos de antenas aplicadas ao 5G no Brasil, principalmente para a faixa de frequências de 3,3GHz à 3,8GHz. Por isso, além de um projeto, espera-se contribuir com uma metodologia que permita o projeto desta antena sob outras condições (como faixas de frequência e/ou materiais).

## **1.6 Considerações finais**

Nesse capítulo apresentou-se conceitos introdutórios e definiu-se as motivações para se estudar e projetar antenas com características aplicáveis as redes celulares 5G, dando enfoque às antenas com polarização circular. Além disso, definiu-se os objetivos a serem alcançados. Esse capítulo é base para os Capítulo 2 (em que é apresentado o referencial teórico), Capítulo 3 (em que é apresentado a metodologia de desenvolvimento) e o Capítulo 4 (em que são apresentados os principais resultados e discussões sobre o projeto).

# Capítulo 2

## REFERENCIAL TEÓRICO

---

### 2.1 Considerações iniciais

Este projeto final de curso tem como objetivo principal o projeto de uma antena de microfita com polarização circular banda larga para operar na faixa de frequências padronizada para o 5G no Brasil no entorno de 3,5GHz. Assim, pode-se dividir o projeto em duas partes:

(a) Análise numérica da antena de microfita com fenda no formato de U assimétrico inserida no elemento ressonador para operação banda larga com polarização circular apresentada em [10].

(b) Reprojeto da antena do artigo [10] para operar na faixa de frequências no entorno de 3,5GHz.

Para análises numéricas, bem como o reprojeto, deve-se ter uma fundamentação teórica sobre antenas de microfita com fenda no formato de U assimétrico inserida no elemento ressonador para operação banda larga com polarização circular. Por isso, neste capítulo são apresentados os conceitos a respeito do assunto, tendo como sequência lógica a explicação teórica baseada na fundamentação descrita no artigo [10]. Assim, parte-se da geometria apresentada na Figura 2.1.

Na Figura 2.1 observa-se que a geometria a ser estudada é uma antena de microfita com:

(a) Um elemento ressonador metálico quadrado (com largura  $w_p$  e comprimento  $l_p$ ) no qual há uma fenda no formato de U assimétrico (controladas pelas variáveis  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$  e  $u$ ).

(b) Um laminado dielétrico (com largura  $w_s$ , comprimento  $l_s$ , altura  $h$ , permissividade dielétrica relativa  $\epsilon_r$  e tangente de perdas  $\tan(\delta)$ ).

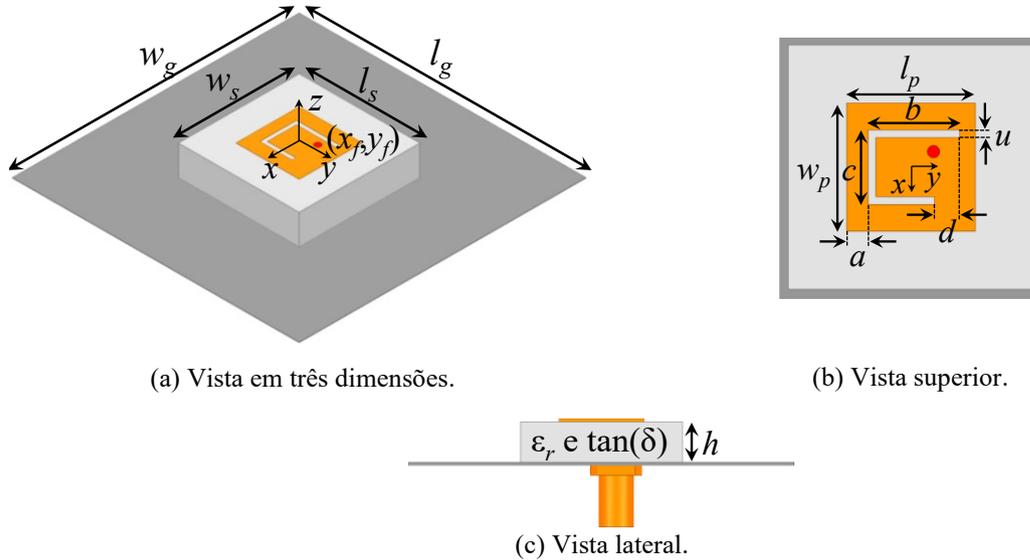
(c) Um plano de terra metálico (com largura  $w_g$  e comprimento  $l_g$ ).

(d) Uma sonda coaxial de alimentação com impedância característica  $Z_0 = 50\Omega$  (deslocada do centro do eixo de coordenadas nas direções  $x$  e  $y$ , respectivamente, pelas variáveis  $x_f$  e  $y_f$ ).

A geometria apresentada foi desenvolvida a partir de um método de operação em modo triplo, proposto para aumentar a largura de banda em polarização circular de antenas de

microfita de alimentação única [10]. Para tal, utiliza-se da análise do modo característico para compreender a física que permite essa operação.

**Figura 2.1 – Ilustração da antena de microfita com fenda no formato de U assimétrico inserida no elemento ressonador para operação banda larga com polarização circular apresenta em [10].**



Fonte: adaptado de (11).

## 2.2 Teoria do modo característico

A análise de modo característico (CMA do inglês *Characteristic Mode Analysis*) não é uma teoria nova, sendo os primeiros estudos relacionados ao tema apresentados no início dos anos 1960 [15]. A CMA pode ser definida como os modos de corrente ortogonais suportados em superfícies condutoras [16]. Basicamente, a CMA é uma abordagem matemática para calcular um conjunto de modos de corrente de qualquer estrutura condutora no espaço livre sem usar a porta de alimentação. Essa análise fornece a resposta em termos de autovalores ( $\lambda_n$ ), ângulo característico ( $\alpha_n$ ), corrente de superfície ( $J$ ), irradiação de campo e significância modal (MS) para encontrar modos de ressonância dominantes.

A análise de CMA diz que a corrente total  $J$  que circula sobre a superfície de qualquer corpo condutor pode ser expressa como uma superposição linear das correntes características, definidas como (11):

$$J = \sum_{n=1}^N J_n \alpha_n, \quad (2.1)$$

onde  $J_n$  é a corrente característica do modo  $n$  e o ângulo característico  $\alpha_n$  pode ser calculado como:

$$\alpha_n = \pi - \tan^{-1}(\lambda_n), \quad (2.2)$$

A relação entre a potência armazenada e a potência irradiada (diretamente ligadas ao conceito de ressonância) possui valores próprios para cada modo e é usada para analisar a CMA e as informações de irradiação da antena [16]. Apenas os autovalores de modos mais baixos ( $\lambda_n$ ) desempenham um papel significativo na irradiação da antena, enquanto os modos de ordem superior, ou seja, valores maiores de  $n$ , não desempenham um papel significativo na irradiação. Para calcular os modos característicos de uma superfície condutora tem-se:

$$X(J_n) = \lambda_n R(J_n), \quad (2.3)$$

onde  $X$  e  $R$  estão relacionados a matriz de impedância de entrada da antena, dada por  $Z = R + jX$ .

Geralmente o gráfico de autovalor *versus* frequência assume valores muito altos de  $\lambda_n$ , então, torna-se difícil (ou praticamente impossível) classificar o modo dominante de irradiação da antena usando autovalores [16]. Este problema pode ser minimizado analisando a significância modal, dada por:

$$MS_n = \frac{1}{|1 + j\lambda_n|}, \quad (2.4)$$

e o ângulo característico. A partir de  $MS_n$  e  $\alpha_n$  pode-se avaliar todos os aspectos da capacidade de irradiação de modos individuais. A  $MS_n$  representa a contribuição potencial de um modo particular para a irradiação total quando uma fonte ou excitação é aplicada. Já  $\alpha_n$  caracteriza fisicamente o ângulo de fase entre uma corrente característica e o campo distante característico correspondente. Um modo está em ressonância quando  $MS$  é igual a um ou quando  $\alpha_n$  está próximo de  $\pi$  (ou  $180^\circ$ ) [10].

Partindo da CMA, para que uma antena apresente irradiação em polarização circular, pelo menos dois modos devem ser excitados simultaneamente com  $MS$  igual e diferença de  $\alpha_n$  de  $\pi/2$  (ou  $90^\circ$ ). Entretanto, para que a largura de faixa com irradiação em polarização circular possa ser aumentada, deve-se ter mais de dois modos excitados simultaneamente com  $MS$  igual e diferença de  $\alpha_n$  de  $90^\circ$ . Esse é o caso do trabalho apresentado em [10], em que tem-se uma situação em que três modos são excitados com essas características.

### 2.3 Operação em polarização circular de banda larga de modo triplo

A Figura 2.2 ilustra o conceito proposto de operação faixa larga em polarização circular utilizando a excitação de modo triplo com MS igual e diferença de  $\alpha_n$  de  $90^\circ$ . Observa-se três modos, em que  $f_1, f_2$  e  $f_3$  são, respectivamente, das frequências de ressonância. Tem-se também  $J_1, J_2$  e  $J_3$ , respectivamente, as correntes características de cada modo. É desejado  $\alpha_n = 90^\circ$  para os pares de modo (1 e 2) e (2 e 3) e que cada par de modos seja polarizado ortogonalmente. O modo 2 é um modo compartilhado pelos modos 1 e o modo 3. As correntes  $J_1$  e  $J_3$  devem ter a mesma polarização, mas fase oposta, e ser perpendiculares à polarização de  $J_2$ . A combinação dos modos 1 e 2 ( $J_1 + J_2$ ) leva a um modo com polarização circular na frequência  $f_{cp1}$  e a combinação dos modos 2 e 3 ( $J_2 + J_3$ ) leva a um modo com polarização circular na frequência  $f_{cp2}$ . Se o dimensionamento da antena for corretamente desenvolvido, os bandas dos modos  $f_{cp1}$  (banda inferior) e  $f_{cp2}$  (banda superior) se unem formando uma banda única e faixa larga em polarização circular. Entretanto, isso só ocorre, pois, a fase do modo 1 está atrasada em relação ao modo 2, e a fase do modo 2 está atrasada em relação ao modo 3, de modo que os dois modos em polarização circular têm o mesmo sentido, nesse caso polarização circular à esquerda (LHCP do inglês *Left-Hand Circular Polarization*), levando a uma maior largura de banda em polarização circular.

O conceito de operação em polarização circular banda larga de modo triplo é validado em [10] a partir da antena de microfita quadrada com fenda no formato de U assimétrico inserida no elemento ressonador. Nesse caso, os modos de operação são: um modo devido à irradiação provocada na fenda (modo 1), um modo análogo ao  $TM_{10}$  das antenas de microfita (modo 2) e um modo análogo ao  $TM_{01}$  das antenas de microfita (modo 3). Segundo a formulação apresentada nesse artigo, as frequências de ressonância desses modos podem ser calculadas como:

$$f_{\text{fenda}} = \frac{3 \times 10^8}{2l_{\text{eff}}^{\text{fenda}} \sqrt{\epsilon_{\text{eff}}}}, \quad (\text{a})$$

$$f_{TM_{10}} = \frac{3 \times 10^8}{2l_{\text{eff}}^{TM_{10}} \sqrt{\epsilon_{\text{eff}}}} \quad \text{e} \quad (\text{b}) \quad (2.5)$$

$$f_{TM_{01}} = \frac{3 \times 10^8}{2l_{\text{eff}}^{TM_{01}} \sqrt{\epsilon_{\text{eff}}}}, \quad (\text{c})$$

onde

$$l_{eff}^{fenda} = 2b - d + c - 2u, \quad (a)$$

$$l_{eff}^{TM_{10}} = w_p + 2\Delta l(l_p) \quad e \quad (b) \quad (2.6)$$

$$l_{eff}^{TM_{01}} = l_p - a - u + 2\Delta l(w_p), \quad (c)$$

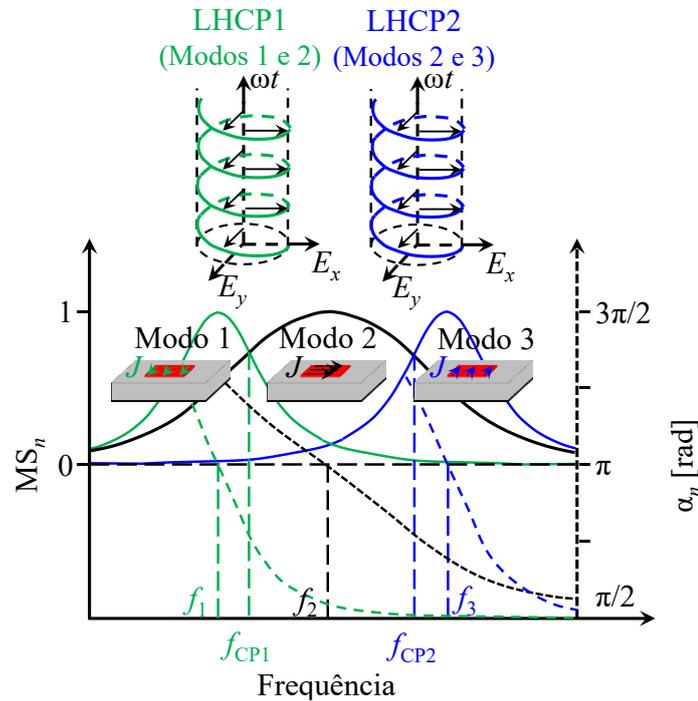
e

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left( 1 + \frac{10h}{w_p} \right)^{-\frac{1}{2}}, \quad (a)$$

$$\Delta l(l_p) = 0,412 \left( \frac{\epsilon_{eff} + 0,3}{\epsilon_{eff} - 0,258} \right) \left( \frac{l_p/h + 0,264}{l_p/h + 0,8} \right) e \quad (b) \quad (2.7)$$

$$\Delta l(w_p) = 0,412 \left( \frac{\epsilon_{eff} + 0,3}{\epsilon_{eff} - 0,258} \right) \left( \frac{w_p/h + 0,264}{w_p/h + 0,8} \right). \quad (c)$$

Figura 2.2 – Ilustração do conceito de operação em polarização circular de banda larga de modo triplo.



Fonte: adaptado de [10].

## 2.4 Antena de microfita com operação em polarização circular de banda larga

A antena apresentada em [10] segue a geometria da Figura 2.1. Os autores desenvolveram o projeto no substrato dielétrico Rogers AD250C com  $\epsilon_r = 2,5$ ,  $\tan(\delta) = 0,0013$

e  $h = 6,3\text{mm}$ , de modo que as variáveis que compõem a antena são  $w_g = l_g = 60\text{mm}$ ,  $w_s = l_s = 25,2\text{mm}$ ,  $w_p = l_p = 13,2\text{mm}$ ,  $a = 2,2\text{mm}$ ,  $b = 9,4\text{mm}$ ,  $c = 7,7\text{mm}$ ,  $d = 2,6\text{mm}$ ,  $u = 0,8\text{mm}$ ,  $x_f = -1,6\text{mm}$  e  $y_f = 2,3\text{mm}$ . Então, das equações (2.5) à (2.7) tem-se  $f_{\text{fenda}} \cong 4,69\text{GHz}$ ,  $f_{\text{TM10}} \cong 5,56\text{GHz}$  e  $f_{\text{TM01}} \cong 6,62\text{GHz}$  e, das análises de simulação apresentadas no trabalho, observa-se  $f_{\text{cp1}} \cong 5,0\text{GHz}$  e  $f_{\text{cp2}} \cong 5,7\text{GHz}$ .

Para validar a antena apresentada em [10], construiu-se o modelo no simulador Ansys Electronics Desktop, empregando o módulo de simulação HFSS (do inglês *High Frequency Structure Simulator*). Para tal, utilizou-se o tipo de solução modal, fazendo a alimentação por um conector SMA com impedância característica  $Z_0 = 50\Omega$ , em que emulou-se a excitação por uma *lumped port*.

A primeira métrica analisada no modelo foi o coeficiente de reflexão ( $S_{11}$ ). O  $S_{11}$  é um parâmetro utilizado em dispositivos de micro-ondas para quantificar o grau de casamento de impedâncias, sendo empregado como um dos principais parâmetros para definir a faixa (ou banda) em que o dispositivo pode operar em relação a esse critério. O  $S_{11}$  pode ser calculado em escala logarítmica como [6]:

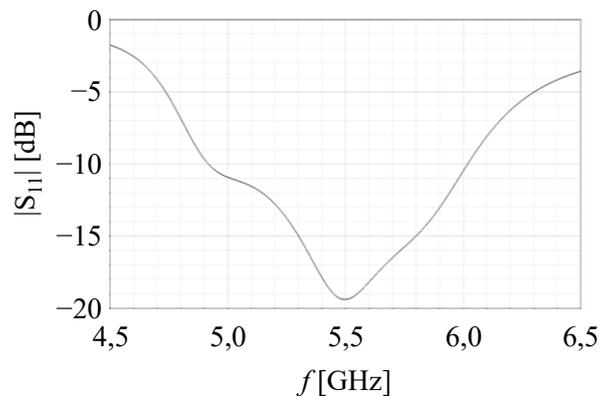
$$|S_{11}|[\text{dB}] = 20 \log \left( \left| \frac{Z_{en} - Z_0}{Z_{en} + Z_0} \right| \right), \quad (2.8)$$

em que  $Z_{en}$  é a impedância de entrada do dispositivo. Em casos práticos, geralmente a largura de faixa de uma antena ( $B_w$ ) em relação ao casamento de impedâncias é definida com a faixa de frequências em que  $|S_{11}|^2 [\text{dB}] \leq -10\text{dB}$  [17]. O valor de  $|S_{11}| [\text{dB}] \leq -10\text{dB}$  em escala linear remete à  $|S_{11}| = 0,1$  (para a relação entre potência incidente e refletida), o que significa que para tal critério, na banda de operação da antena, ao menos 90% da potência disponível pelo gerador (ou circuito conectado aos terminais) não será refletida, podendo assim ser irradiada (é importante destacar que essa totalidade só é de fato irradiada se não existirem perdas no processo de irradiação). Então, da Figura 2.3(a), nota-se que a antena apresentado em [10] opera de 4,918GHz à 6,019GHz em termos de casamento de impedâncias. Assim, sabendo que a largura de banda pode ser escrita em termos de percentual de frequência central de operação, como sendo [5]:

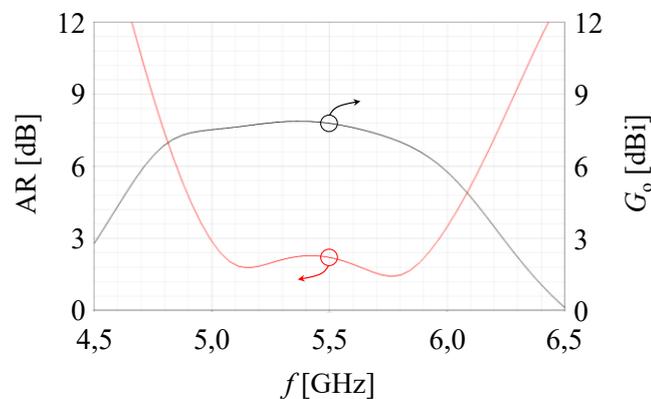
$$B_w = \left( 2 \left( \frac{f_{\text{máx}} - f_{\text{mín}}}{f_{\text{máx}} + f_{\text{mín}}} \right) \right) 100\%, \quad (2.9)$$

onde  $f_{min}$  e  $f_{máx}$  são, respectivamente, as frequências limite da banda, ou seja, a faixa de frequência onde tem-se o início e o fim de  $|S_{11}|$  [dB]  $\leq -10$ dB, observa-se para o quesito casamento de impedâncias uma banda percentual de aproximadamente 20,13%. É importante destacar que esse valor é cerca de 20 vezes maior do que observado em antenas de microfita retangulares alimentadas por sonda coaxial [5], o que comprova a eficácia da operação em modo triplo para aumentar a largura de banda.

**Figura 2.3 – Respostas de em frequência dos parâmetros de casamento de impedância e irradiação da antenna apresentada em [10].**



(a) Coeficiente de reflexão.



(b) Razão axial e ganho realizável.

**Fonte: o autor**

A segunda métrica analisada no modelo foi a razão axial (já apresentada na sessão 1.2) na direção de máxima irradiação. É importante destacar que nesse caso a direção de máxima irradiação ocorre em  $+z$ , o que remete aos ângulos (em coordenadas esféricas)  $\theta = 0^\circ$  e  $\varphi$  assumindo qualquer valor (de  $0^\circ$  a  $360^\circ$ ). Como já discutido anteriormente, em casos práticos, geralmente a largura de faixa de uma antena em termos de polarização circular é definida com a faixa de frequências em que  $AR \leq 3$ dB. Então, da Figura 2.3(b), nota-se que a antena apresentada em [10] opera de 4,992GHz à 5,968GHz em relação à polarização circular, o que

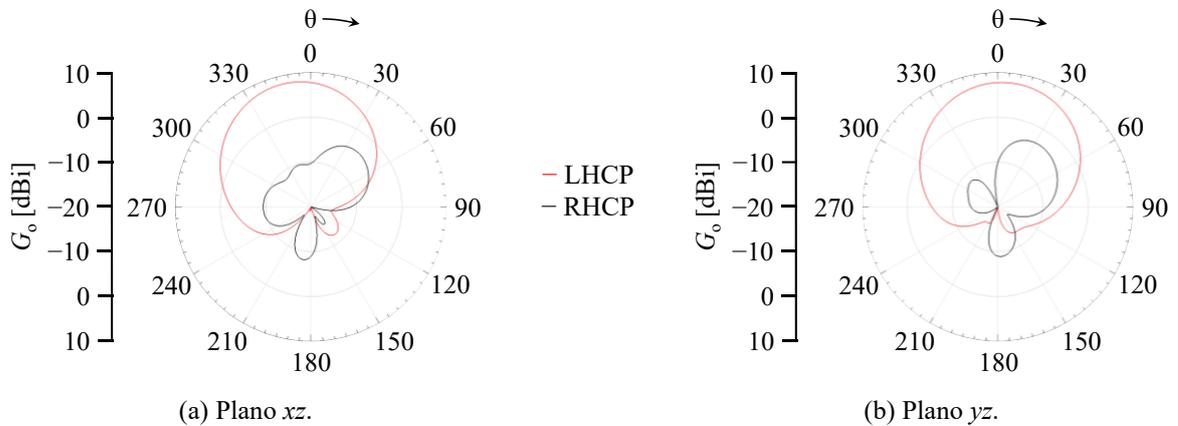
remete uma banda percentual de aproximadamente 17,81%. Novamente é importante destacar que esse valor é cerca de 20 vezes maior do que observado em antenas de microfita retangulares alimentadas por sonda coaxial [6], o que comprova novamente a eficácia da operação em modo triplo para aumentar a largura de banda.

Analisando os resultados de  $|S_{11}|$  e AR fica claro que a banda real da antena (que contemple tanto casamento de impedância quanto polarização circular) é de 4,992GHz à 5,968GHz,  $B_w = 17,81\%$ . Ou seja, nesse caso, o parâmetro que define os limites de operação é a polarização. Entretanto, é importante destacar que tal condição pode não se aplicar a todas as configurações possíveis dessa antena, devendo ser analisado caso a caso. O que é importante frisar é que geralmente as bandas em  $|S_{11}|$  e AR tem limites diferentes.

A terceira métrica analisada no modelo foi o ganho realizável ( $G_o$ ) na direção de máxima irradiação em função da frequência. O ganho realizável é definido como a capacidade de concentração da irradiação em certa direção do espaço já levando em consideração perdas de potências na irradiação por efeito Joule e descasamento de impedâncias. Então, da Figura 2.3(b), nota-se que em toda a banda de operação, a antena apresenta  $G_o \geq 6\text{dBi}$ , chegando à 7,9dBi em 5,4GHz. Tal valor está em plena conformidade com o observado em antenas de microfita retangulares alimentadas por sonda coaxial (seja de polarização linear ou circular) [5]. Assim, conclui-se que não houve perdas no ganho da antena para que a operação em modo triplo leve ao aumento da banda de operação.

A quarta métrica analisada no modelo foi o diagrama de irradiação do ganho realizável, apresentado na Figura 2.4. Esse parâmetro descreve o formato de irradiação em termos de coordenadas esféricas, sendo mais didático a apresentação em cortes em duas dimensões. Para tal, definiu-se a frequência de 5,5GHz (aproximadamente a frequência central da banda de operação) e os planos  $xz$  (variando  $\theta$  com  $\varphi = 0^\circ$ ) e  $yz$  (variando  $\theta$  com  $\varphi = 90^\circ$ ) para este levantamento. Primeiramente, destaca-se que o formato da irradiação é muito similar ao observado em antenas de microfita retangulares alimentadas por sonda coaxial com polarização [5], de modo que a operação em modo triplo não trouxe como consequência perturbações na irradiação. Outro fato importante, como mencionado na seção 2.3, a polarização observada é a circular à esquerda, LHCP, de modo que se observa alta rejeição de polarização circular à direita (RHCP do inglês *Right-Handed Circular Polarization*).

**Figura 2.4 – Diagramas de irradiação de ganho realizável da antenna apresentada em (10) na frequência de 5,5GHz.**



Fonte: o autor

## 2.5 Considerações finais

Neste Capítulo apresentou-se os conceitos teóricos a respeito do projeto da antenna de microfita com fenda no formato de U assimétrico inserida no elemento ressonador para operação banda larga com polarização circular. Para tal, além da apresentação da estrutura e dos conceitos matemáticos, reproduziu-se a antenna apresentada em [10] e os resultados foram estudados com o objetivo de compreender melhor as características. Assim, tem-se a bagagem necessária para a execução desse projeto na faixa de frequências especificada para o 5G no Brasil (Conforme o Capítulo 4), segundo a metodologia e os recursos apresentados no Capítulo 3.

# Capítulo 3

## MATERIAIS E MÉTODOS

---

### 3.1 Considerações iniciais

Esse projeto final de curso visa apresentar o projeto numérico de uma antena de microfita com fenda no formato de U assimétrico inserida no elemento ressonador para operação em banda larga com polarização circular, podendo assim ser aplicada em redes celulares 5G na faixa de frequências no entorno de 3,5GHz. Desse modo, o desenvolvimento parte de estudos teóricos (em livros e artigos), sendo finalizado em simulações eletromagnéticas no programa Ansys Electronics Desktop, utilizando o módulo HFSS.

### 3.2 Metodologia de desenvolvimento

A metodologia de desenvolvimento deste trabalho consiste em estudar e reproduzir a antena apresentada em [10] (o que já foi realizado no Capítulo 2) e reprojeter essa mesma geometria para operar na faixa de frequência no entorno de 3,5GHz. Desse modo, seguiu-se as seguintes etapas:

(a) Estudo teórico da antena apresenta em [10]: Estudou-se o trabalho de referência principal, buscando informações complementares em livros e artigos sobre o tema, com o objetivo de compreender a física a partir da qual o modelo funciona.

(b) Reprodução numérica da antena apresenta em [10]: Construiu-se no simulador um modelo numérico seguindo a geometria e os materiais apresentados no trabalho de referência principal. Nessa etapa, procurou-se compreender os resultados apresentados, comparando-os com os descritos no artigo.

(c) Reprojeto numérico da antena apresenta em [10] para a faixa de frequência de 3,5GHz: O modelo numérico da reprodução da antena apresenta no trabalho de referência principal foi construído parametrizado, ou seja, em função das variáveis descritas na Figura 2.1. Então, sabendo que as frequências de ressonância desse tipo de antena têm relação direta com o comprimento do elemento ressonador (que nesse caso é igual à largura, conforme a Seção 2.3), escreveu-se as variáveis que compõem a geometria em função de  $l_p$  da seguinte forma:

$$\begin{aligned}
l_g = w_g &\cong 4,545l_p, & (a) & & l_s = w_s &\cong 1,909l_p & (b) \\
w_p &= l_p, & (c) & & h &\cong 0,477l_p, & (d) \\
a &\cong 0,167l_p, & (e) & & b &\cong 0,712l_p, & (f) \\
c &\cong 0,583l_p, & (g) & & d &\cong 0,197l_p, & (h) \\
u &\cong 0,061l_p, & (i) & & x_f &\cong -0,121l_p \text{ e} & (j) \\
y_f &\cong 0,174l_p, & (l) & & & & 
\end{aligned} \tag{3.1}$$

É importante destacar que as constantes apresentadas em (3.1) são as relações de proporcionalidade entre as variáveis e  $l_p$  para o modelo de [11]. Tais valores foram encontrados a partir de otimizações numéricas para as características do modelo em questão, sendo adotadas com ponto de partida o reprojeto desse trabalho. Assim, recalculou-se  $l_p$  (com base nas equações de 2.5 a 2.7) para que a antena (construída no substrato dielétrico Rogers AD250C com  $\epsilon_r = 2,5$ ,  $\tan(\delta) = 0,0013$ ) operar na faixa de frequência de 3,5GHz. Entretanto, para um melhor desempenho da antena, os valores das variáveis que compõe a geometria foram otimizados numericamente, levando a pequenas modificações na equação (3.1).

Os estudos numéricos tiveram como base a análise dos seguintes parâmetros:

- (a) Análise da largura de faixa em termos de casamento de impedâncias (observando o coeficiente de reflexão).
- (b) Análise da largura de faixa em termos da polarização circular (observando a razão axial).
- (c) Análise do ganho realizável em função da frequência (na faixa de frequências de operação da antena).
- (d) Análise dos diagramas de irradiação de ganho (em 2 dimensões) em frequências específicas na faixa de operação da antena.

### 3.3 Recursos necessários

Como já mencionado, utilizou-se o ambiente de simulação numérica no programa Ansys Electronics Desktop, empregando o módulo de simulação HFSS, para o projeto antena de microfita com fenda no formato de U assimétrico inserida no elemento ressonador para operação em banda larga com polarização circular. As simulações foram realizadas no Laboratório de Robótica, Comunicação e Controle do Campus Patos de Minas da Universidade

Federal de Uberlândia. É importante destacar que tais simulações foram realizadas em um desktop adquirido a partir do fomento concedido pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) no Projeto RoboPatos APQ-02616-22.

### **3.4 Considerações finais**

Neste Capítulo apresentou-se a metodologia e os recursos necessários para o desenvolvimento deste trabalho de conclusão de curso. Assim, seguindo as etapas descritas e utilizando o simulador apresentado, realizou-se o desenvolvimento que está apresentado no Capítulo 4.

# Capítulo 4

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

---

### 4.1 Considerações iniciais

O projeto da antena de microfita com fenda no formato de U assimétrico inserida no elemento ressonador para operação em banda larga com polarização circular na faixa de frequências de 3,5GHz do 5G segue os conceitos apresentados no referencial teórico (Capítulo 2) e a metodologia de desenvolvimento e recursos (Capítulo 3). Para que o modelo apresente as respostas desejadas, um conjunto de estudos em simulação também foram realizados.

### 4.2 Reprojetado da antena para a faixa de 3,5GHz

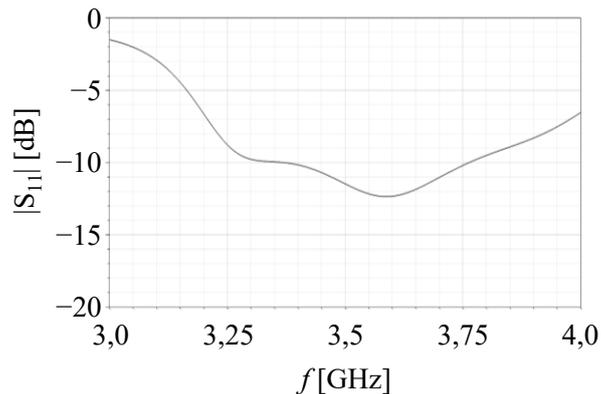
Analisando os resultados da reprodução da antena apresentada em [10] chega-se a importantes conclusões. Primeiramente, observando as frequências de ressonância (a partir das equações 2.5 a 2.7), nota-se que  $f_{fenda} \cong 4,68\text{GHz}$ ,  $f_{TM10} \cong 5,57\text{GHz}$  e  $f_{TM01} \cong 6,64\text{GHz}$ . Assim, a relação entre as frequências de ressonância é  $f_{TM10}/f_{fenda} \cong 1,19$  e  $f_{TM01}/f_{TM10} \cong 1,19$ , em que tal valor foi o otimizado pelos autores para que as frequências  $f_{cp1}$  e  $f_{cp2}$  (ilustradas na Figura 2.2 e com valores numericamente encontrados com sendo  $f_{cp1} \cong 5,0\text{GHz}$  e  $f_{cp2} \cong 5,7\text{GHz}$ ) possam levar aos resultados de significância modal e ângulo característico que produzem a resposta faixa larga em polarização circular. Além disso, nota-se que as faixas de frequência em  $|S_{11}| [\text{dB}] \leq -10\text{dB}$  e  $\text{AR} \leq 3\text{dB}$  são, respectivamente, 4,918GHz à 6,019GHz e 4,992GHz à 5,968GHz. Desse modo, conclui-se que a antena tem operação iniciando um pouco abaixo de  $f_{cp1}$  e terminando um pouco acima de  $f_{cp2}$ , e que  $f_{fenda}$  e  $f_{TM01}$  estão fora da banda, enquanto  $f_{TM10}$  está mais próximo do limite superior da operação.

A partir das conclusões observadas e seguindo a formulação matemática apresenta no Capítulo 3 (equação 3.1), considerando o substrato dielétrico Rogers AD250C com  $\epsilon_r = 2,5$  e  $\tan(\delta) = 0,0013$ , recalculou-se as dimensões da antena para que a faixa de operação pudesse estar de 3,3GHz à 3,8GHz (ou mais próximo possível). Desse modo, chegou-se à  $l_p \cong 19,75\text{mm}$  e conseqüentemente,  $h \cong 9,4\text{mm}$ ,  $w_g = l_g \cong 88\text{mm}$ ,  $w_s = l_s \cong 37,7\text{mm}$ ,  $w_p \cong 19,75\text{mm}$ ,  $a \cong 3,3\text{mm}$ ,  $b \cong 14,1\text{mm}$ ,  $c \cong 11,5\text{mm}$ ,  $d \cong 3,9\text{mm}$ ,  $u \cong 1,2\text{mm}$ ,  $x_f \cong -2,4\text{mm}$  e  $y_f \cong 3,4\text{mm}$ . Nessas condições, nota-se que  $f_{fenda} \cong 3,13\text{GHz}$ ,  $f_{TM10} \cong 3,73\text{GHz}$  e  $f_{TM01} \cong 4,44\text{GHz}$ . Assim,

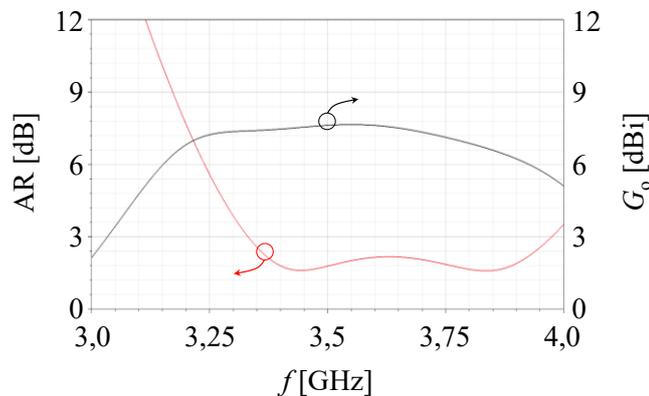
tem-se a relação entre as frequências de ressonância  $f_{TM10}/f_{fenda} \cong 1,19$  e  $f_{TM01}/f_{TM10} \cong 1,19$ , de modo que se tem concordância com o previsto em [10].

Simulou-se o modelo com as variáveis calculadas para a faixa desejada e analisou-se as respostas em frequência do  $|S_{11}|$ , AR e  $G_o$ , como mostrado na Figura 4.1. É importante destacar novamente que AR e  $G_o$  foram quantificados na direção de máxima irradiação,  $+z$ . Observando a Figura 4.1(a), nota-se que o modelo reprojetoado opera de 3,37GHz à 3,76GHz em termos de casamento de impedâncias, o que remete a uma banda percentual de aproximadamente 11%. Na Figura 4.1(b), nota-se que o modelo reprojetoado opera de 3,33GHz à 3,97GHz em termos de polarização circular, o que remete a uma banda percentual de aproximadamente 17,5%. Ainda na Figura 4.1(b), nota-se em toda a banda de operação que a antena apresenta  $G_o \geq 6\text{dBi}$ , chegando à 7,65dBi em 3,55GHz.

**Figura 4.1 – Respostas em frequência dos parâmetros de casamento de impedância e irradiação do modelo inicial da antena reprojetoada para a faixa de 3,5GHz.**



(a) Coeficiente de reflexão.



(b) Razão axial e ganho realizável.

**Fonte: o autor**

Com os resultados apresentados na Figura 4.1 concluiu-se que a antena reprojetoada opera em parte das subfaixas para o 5G do espectro situado entre 3,3GHz até 3,8GHz,

apresentadas na Tabela 1.1. Nota-se que a banda em  $|S_{11}|$  não opera nas subfaixas 1 a 6 e 47 a 50, enquanto a banda em AR não opera nas subfaixas 1 a 3. Tendo em vista que a antena proposta opere em uma porção maior dessa aplicação, foi realizada uma análise paramétrica das variáveis de projeto do modelo.

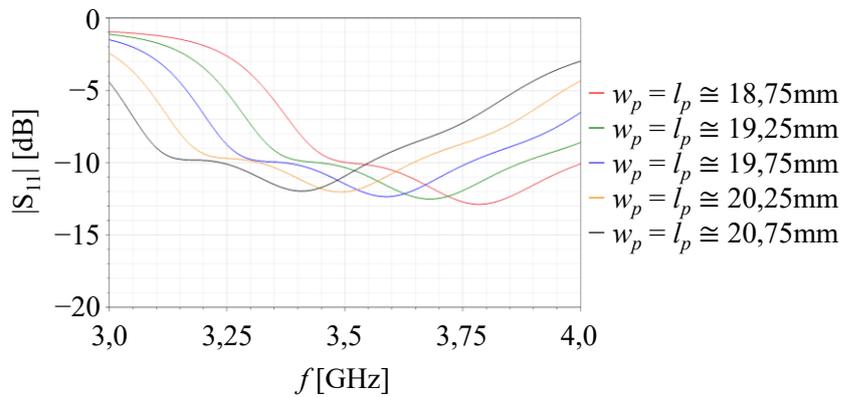
#### 4.2.1 Estudo das variáveis $l_p$ e $w_p$

A primeira variável estudada foi o comprimento  $l_p$  do irradiador. Entretanto, é importante destacar que a formulação apresentada na equação (3.1) foi mantida, de modo que ao variar  $l_p$  varia-se conjuntamente os valores de todas as demais variáveis. Outra informação importante é que, assim como o modelo apresentado em [10], manteve-se a antena quadrada, de modo que os valores da largura  $w_p$  do irradiador foram mantidas iguais à  $l_p$ .

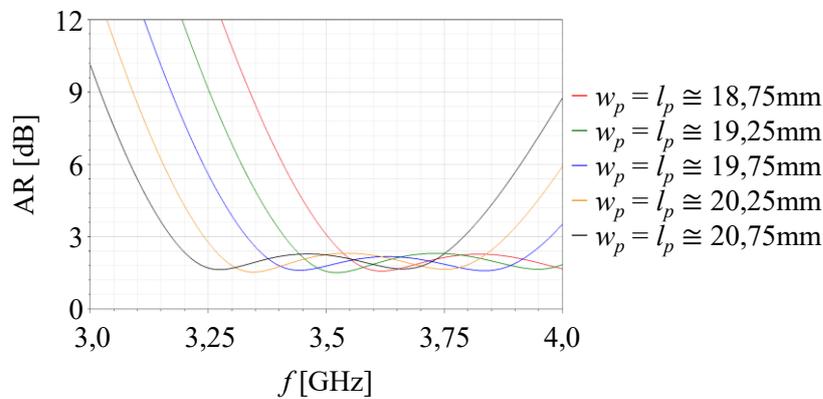
Tendo em vista que o valor calculado de  $l_p$  foi 19,75mm, definiu-se a variação desse parâmetro de 18,75mm à 20,75mm e simulou-se a geometria, analisando a faixa de frequência de operação a partir das respostas em frequência de  $|S_{11}|$  e AR (que foi quantificada na direção de máxima irradiação,  $+z$ ), como mostrado na Figura 4.2. Na Figura 4.2(a) tem-se o estudo do impacto de  $l_p$  no coeficiente de reflexão, enquanto, na Figura 4.2(b) tem-se o estudo do impacto de  $l_p$  na razão axial. Conforme já esperado (pela teoria apresentada no Capítulo 2), variando  $l_p$  desloca-se a faixa de operação (tanto em  $|S_{11}|$  quanto em AR), e observa-se que a operação é deslocada para frequências menores quando maior o valor de  $l_p$ .

De acordo com a Tabela 4.1, quanto maior  $l_p$  menor é a largura de faixa tanto em  $|S_{11}|$  quanto em AR. Observa-se também que  $l_p = w_p \cong 19,75\text{mm}$ , dentre os valores estudados, é o valor ideal para o comprimento e largura do ressonador para este projeto. Tal valor não leva ao maior valor da banda de operação, entretanto, garante que a antena opere, de forma conjunta em  $|S_{11}|$  e AR, o mais próximo possível dos limites desejados para o projeto (3,3GHz à 3,8GHz). Desse modo, pode-se afirmar que a formulação matemática apresentada no Capítulo 3 possui boa eficiência no reprojeto dessa antena em termos da posição do espectro para operação. Este fato que é considerado como uma importante contribuição desse trabalho, uma vez que permite que trabalhos futuros sobre o tema possam ser direcionados. Entretanto, a partir desse estudo, não foi possível melhorar a largura de faixa de operação, atendendo assim um número maior de subfaixas do 5G. Assim, é necessário estudar outros parâmetros da geometria da antena com o objetivo de maximizar os limites de operação.

Figura 4.2 – Estudo do impacto das variáveis  $l_p$  e  $w_p$  na faixa de frequência de operação da antena proposta.



(a) Coeficiente de reflexão.



(b) Razão axial.

Fonte: o autor

Tabela 4.1: Bandas percentuais de operação do estudo das variáveis  $l_p$  e  $w_p$ .

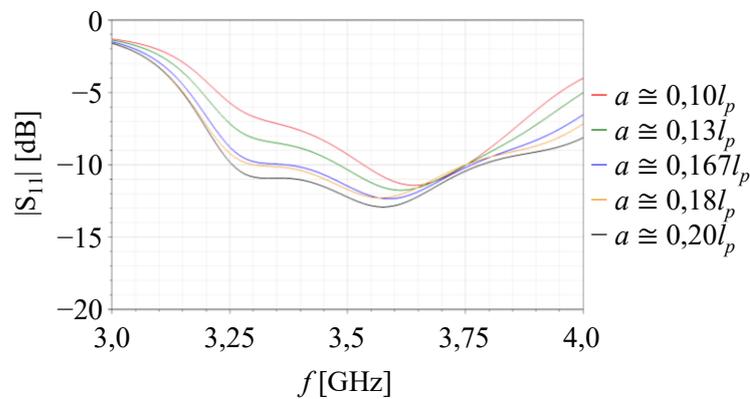
$l_p$ e $w_p$ (mm)	$Bw$ em $ S_{11} $ (%)	$Bw$ em AR (%)
18,75	13,30 (3,51GHz à 4,01GHz)	18,18 (3,51GHz à 4,20GHz)
19,25	12,28 (3,44GHz à 3,89GHz)	17,89 (3,41GHz à 4,08GHz)
19,75	10,94 (3,37GHz à 3,76GHz)	17,53 (3,33GHz à 3,97GHz)
20,25	9,50 (3,32GHz à 3,65GHz)	17,98 (3,24GHz à 3,88GHz)
20,75	9,13 (3,24GHz à 3,55GHz)	17,82 (3,17GHz à 3,79GHz)

## 4.2.2 Estudo da variável $a$

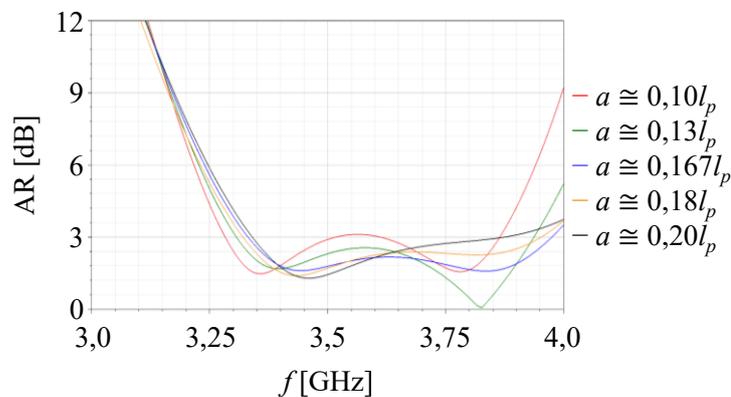
A segunda variável estudada foi a distância  $a$ . Para tal, definiu-se a variação desse parâmetro em função de  $l_p$ . De acordo com a equação (3.1) tem-se originalmente  $a \cong 0,167l_p$ , então, estudou-se de  $0,1l_p$  a  $0,2l_p$ . Novamente, simulou-se a geometria, analisando a faixa de frequência de operação de  $|S_{11}|$  e AR (que também foi quantificada na direção de máxima irradiação,  $+z$ ), como mostrado na Figura 4.3. Na Figura 4.3(a) tem-se o estudo do impacto de  $a$  no  $|S_{11}|$ , enquanto, na Figura 4.3(b) tem-se o estudo do impacto de  $a$  em AR. A Tabela 4.2

apresenta uma melhor visualização dos valores das curvas apresentadas na Figura 4.3. Nota-se que  $a$  (para as condições estudadas) tem pouca influência na faixa de operação em AR, mantendo a  $Bw$  entre 14,7% e 17,53%. Entretanto, verifica-se uma influência maior na faixa de operação em  $|S_{11}|$ , em que a  $Bw$  aumenta, dentre os valores estudados. Para  $a \cong 0,18l_p$  observa-se uma melhora significativa na  $Bw$  em  $|S_{11}|$ , que não opera apenas nas subfaixas 47 a 50, mantendo praticamente o comportamento em AR, que não opera apenas nas subfaixas 1 e 2. Desse modo, definiu-se esse valor com o ideal para  $a$  a partir dessa etapa do projeto.

**Figura 4.3 – Estudo do impacto da variável  $a$  na faixa de frequência de operação da antenna proposta.**



(a) Coeficiente de reflexão.



(b) Razão axial.

Fonte: o autor

**Tabela 4.2: Bandas percentuais de operação do estudo da variável  $a$ .**

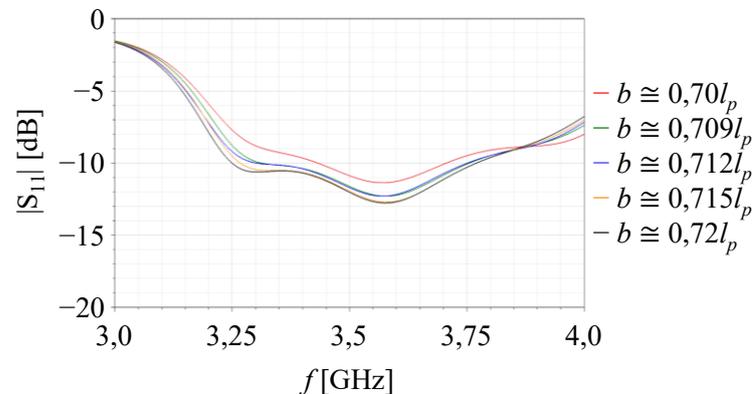
$a$ ( $l_p$ )	$Bw$ em $S_{11}$ (%)	$Bw$ em AR (%)
0,10	6,04 (3,53GHz à 3,75GHz)	16,25 (3,28GHz à 3,86GHz)*
0,13	7,47 (3,48GHz à 3,75GHz)	17,38 (3,31GHz à 3,94GHz)
0,167	10,94 (3,37GHz à 3,76GHz)	17,53 (3,33GHz à 3,97GHz)
0,18	13,33 (3,29GHz à 3,76GHz)	17,33 (3,32GHz à 3,95GHz)
0,20	14,77 (3,26GHz à 3,78GHz)	14,70 (3,34GHz à 3,87GHz)

\* Parte dessa extensão em frequência está levemente superior ao limite de AR.

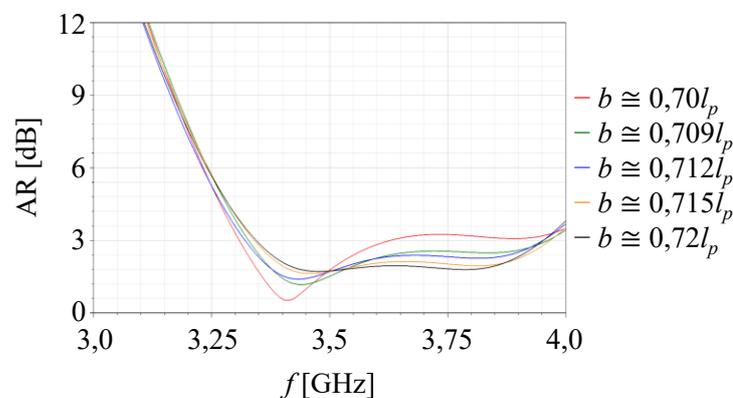
### 4.2.3 Estudo da variável $b$

A terceira variável estudada foi o comprimento  $b$  da fenda em U. Para tal, definiu-se a variação desse parâmetro também em função de  $l_p$ . De acordo com a equação (3.1) tem-se originalmente  $b \cong 0,712l_p$ , então, estudou-se esse parâmetro variando de  $0,7l_p$  à  $0,72l_p$ . Novamente, simulou-se a geometria, analisando a faixa de frequência de operação a partir das respostas em frequência de  $|S_{11}|$  e AR (que também foi quantificada na direção de máxima irradiação,  $+z$ ), como mostrado na Figura 4.4. Na Figura 4.4(a) tem-se o estudo do impacto de  $b$  no coeficiente de reflexão, enquanto, na Figura 4.4(b) tem-se o estudo do impacto de  $b$  na razão axial. A Tabela 4.3 apresenta uma síntese dos valores das curvas apresentadas na Figura 4.4. Nota-se que para os valores de  $b$  mais próximos de  $0,7l_p$  tem-se uma piora significativa na largura de faixa tanto em  $|S_{11}|$  quando em AR. Verifica-se também que a banda em  $|S_{11}|$  tende a aumentar com  $b$  (para as condições estudadas) e que a banda em AR tem pouca modificação para  $0,709l_p < b < 0,72l_p$ .

Figura 4.4 – Estudo do impacto da variável  $b$  na faixa de frequência de operação da antena proposta.



(a) Coeficiente de reflexão.



(b) Razão axial.

Fonte: o autor

**Tabela 4.3: Bandas percentuais de operação do estudo da variável  $b$ .**

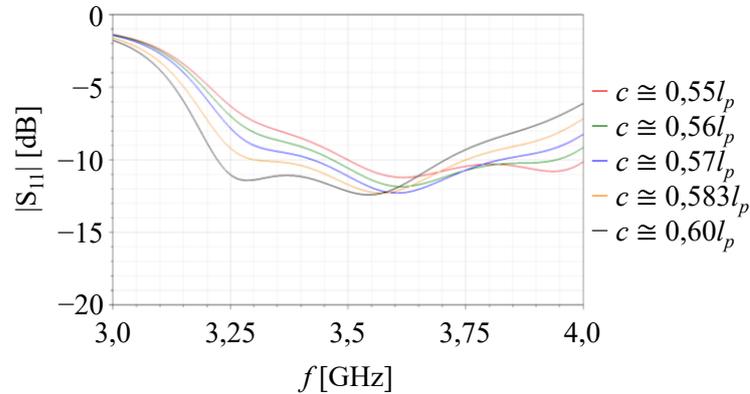
$b (l_p)$	$Bw$ em $S_{11}$ (%)	$Bw$ em AR (%)
0,70	7,84 (3,43GHz à 3,71GHz)	9,22 (3,31GHz à 3,63GHz)
0,709	12,73 (3,31GHz à 3,76GHz)	17,28 (3,33GHz à 3,96GHz)
0,712	13,33 (3,29GHz à 3,76GHz)	17,33 (3,32GHz à 3,95GHz)
0,715	14,51 (3,26GHz à 3,77GHz)	17,24 (3,34GHz à 3,97GHz)
0,72	14,81 (3,25GHz à 3,77GHz)	16,74 (3,34GHz à 3,95GHz)

De acordo com a Figura 4.4 e a Tabela 4.3, tem-se  $b \cong 0,712l_p$ , dentre os valores estudados, como o valor ideal para este projeto. Tal valor não leva ao maior valor da banda de operação, entretanto, garante que a antena opere, de forma conjunta em  $|S_{11}|$  e AR, o mais próximo possível dos limites desejados para o projeto (3,3GHz à 3,8GHz). Desse modo, o valor apresentado na formulação matemática apresentada no Capítulo 3 para  $b$  é o seguido nesse projeto.

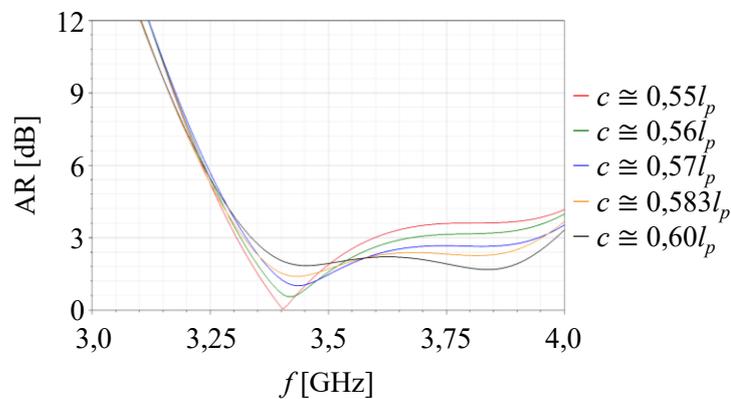
#### 4.2.4 Estudo da variável $c$

A quarta variável estudada foi a largura  $c$  da fenda em U. Para tal, definiu-se a variação desse parâmetro também em função de  $l_p$ . De acordo com a equação (3.1) tem-se originalmente  $c \cong 0,583l_p$ , então, estudou-se esse parâmetro variando de  $0,55l_p$  à  $0,60l_p$ . Novamente, simulou-se a geometria, analisando a faixa de frequência de operação a partir das respostas em frequência de  $|S_{11}|$  e AR (que também foi quantificada na direção de máxima irradiação,  $+z$ ), como mostrado na Figura 4.5. Na Figura 4.5(a) tem-se o estudo do impacto de  $c$  no coeficiente de reflexão, enquanto, na Figura 4.5(b) tem-se o estudo do impacto de  $c$  na razão axial. A Tabela 4.4 apresenta uma síntese dos valores das curvas apresentadas na Figura 4.5. Nota-se que, para as condições estudadas,  $c$  tem pouco impacto na banda em  $|S_{11}|$ , entretanto, afeta consideravelmente a banda em AR. Verifica-se que aumentando  $c$  a banda em  $|S_{11}|$  tende a se deslocar para frequências menores, com pequenas variações em seu valor absoluto. Observa-se também que quando menor os valores de  $c$  piores são os resultados na largura de faixa em AR, sendo que para valores inferiores a  $b \cong 0,57l_p$  a piora torna-se mais acentuada. Destaca-se que  $b \cong 0,583l_p$ , mesmo não sendo situação em que ocorre ao maior valor da banda de operação, garante que a antena opere, de forma conjunta em  $|S_{11}|$  e AR, o mais próximo possível dos limites desejados para o projeto (3,3GHz à 3,8GHz). Desse modo, esse valor, que é o apresentado na formulação matemática apresentada no Capítulo 3, é tido como o ideal nas condições estudadas para o projeto, de modo que é o seguido nas análises posteriores.

Figura 4.5 – Estudo do impacto da variável  $c$  na faixa de frequência de operação da antena proposta.



(a) Coeficiente de reflexão.



(b) Razão axial.

Fonte: o autor

Tabela 4.4: Bandas percentuais de operação do estudo da variável  $c$ .

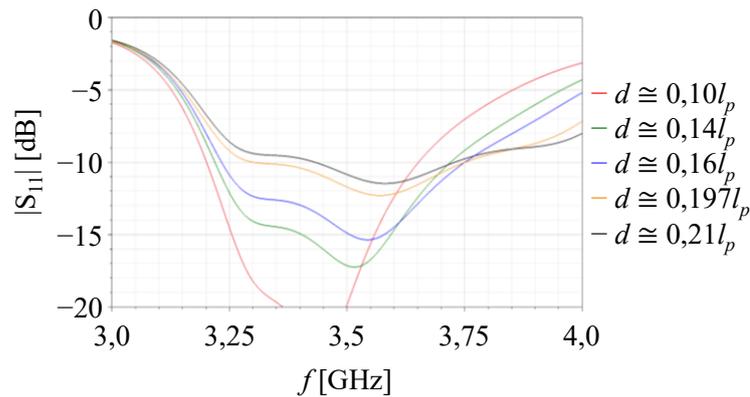
$c$ ( $l_p$ )	$Bw$ em $S_{11}$ (%)	$Bw$ em AR (%)
0,55	13,58 (3,50GHz à 4,01GHz)	8,39 (3,31GHz à 3,60GHz)
0,56	12,69 (3,47GHz à 3,94GHz)	10,32 (3,31GHz à 3,67GHz)
0,57	11,05 (3,42GHz à 3,82GHz)	16,78 (3,33GHz à 3,94GHz)
0,583	13,33 (3,29GHz à 3,76GHz)	17,33 (3,32GHz à 3,95GHz)
0,60	14,14 (3,22GHz à 3,71GHz)	17,49 (3,34GHz à 3,98GHz)

#### 4.2.5 Estudo da variável $d$

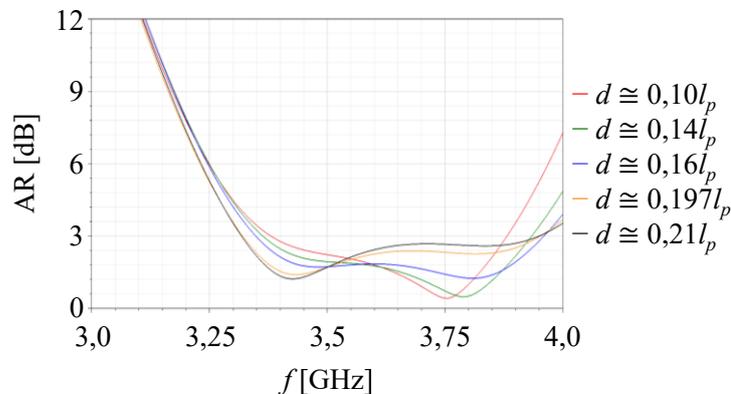
A quinta variável estudada foi o comprimento  $d$ , responsável pela assimetria da fenda em U. Para tal, definiu-se a variação desse parâmetro também em função de  $l_p$ . De acordo com a equação (3.1) tem-se originalmente  $d \cong 0,197l_p$ , então, estudou-se esse parâmetro variando de  $0,1l_p$  à  $0,21l_p$ . Novamente, simulou-se a geometria, analisando a faixa de frequência de operação a partir das respostas em frequência de  $|S_{11}|$  e AR (que também foi quantificada na direção de máxima irradiação,  $+z$ ), como mostrado na Figura 4.6. Na Figura 4.6(a) tem-se o

estudo do impacto de  $d$  no coeficiente de reflexão, enquanto, na Figura 4.6(b) tem-se o estudo do impacto de  $d$  na razão axial. A Tabela 4.5 apresenta uma melhor visualização dos valores das curvas apresentadas na Figura 4.6. Nota-se que, para as condições estudadas,  $d$  provoca a uma mudança considerável na banda em  $|S_{11}|$  apenas para valores maiores que  $0,2l_p$ , ficando entre 13,14% e 14,90% de  $0,10l_p$  até  $0,2l_p$ . Observa-se também, dentre as definições de estudo, que a banda em AR tende a aumentar com  $d$ , porém, tem-se pouca alteração  $0,14l_p$  até  $0,21l_p$ . Destaca-se que  $d \cong 0,197l_p$ , mesmo não sendo situação em que ocorre o maior valor da banda de operação, garante que a antena opere, de forma conjunta em  $|S_{11}|$  e AR, o mais próximo possível dos limites desejados para o projeto (3,3GHz à 3,8GHz). Desse modo, esse valor, que é o apresentado na formulação matemática apresentada no Capítulo 3, é definido como o ideal nas condições estudadas para o projeto. Assim, manteve-se  $d \cong 0,197l_p$  para as análises realizadas na sequência do desenvolvimento.

Figura 4.6 – Estudo do impacto da variável  $d$  na faixa de frequência de operação da antena proposta.



(a) Coeficiente de reflexão.



(b) Razão axial.

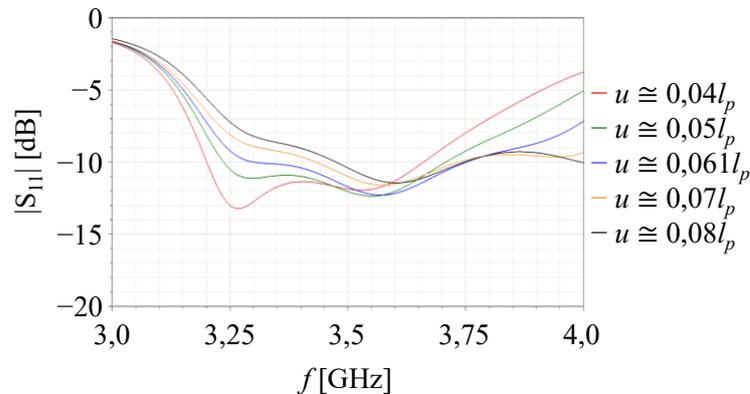
Fonte: o autor

Tabela 4.5: Bandas percentuais de operação do estudo da variável  $d$ .

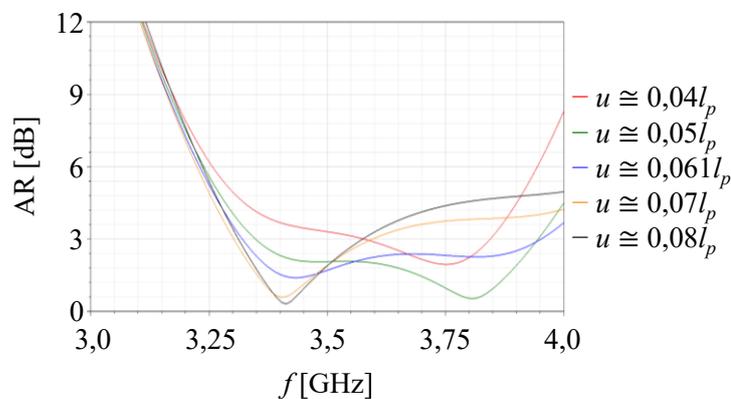
$d$ ( $l_p$ )	$Bw$ em $S_{11}$ (%)	$Bw$ em AR (%)
0,10	13,14 (3,20GHz à 3,65GHz)	13,77 (3,38GHz à 3,88GHz)
0,14	14,41 (3,22GHz à 3,72GHz)	15,64 (3,36GHz à 3,93GHz)
0,16	14,90 (3,23GHz à 3,75GHz)	16,69 (3,35GHz à 3,96GHz)
0,197	13,33 (3,29GHz à 3,76GHz)	17,33 (3,32GHz à 3,95GHz)
0,21	8,38 (3,43GHz à 3,73GHz)	17,33 (3,32GHz à 3,95GHz)

#### 4.2.6 Estudo da variável $u$

A sexta variável estudada foi a largura  $u$  da fenda em U. De acordo com a equação (3.1) tem-se originalmente  $u \cong 0,061l_p$ , então, estudou-se esse parâmetro variando de  $0,04l_p$  à  $0,08l_p$ . Novamente, simulou-se a geometria, analisando o  $|S_{11}|$  e AR (que também foi quantificada na direção de máxima irradiação,  $+z$ ), como mostrado na Figura 4.7. Na Figura 4.7(a) tem-se o estudo do impacto de  $u$  no  $|S_{11}|$ , enquanto, na Figura 4.7(b) tem-se o estudo do impacto de  $u$  em AR, impactos esses que são melhor visualizados na Tabela 4.6.

Figura 4.7 – Estudo do impacto da variável  $u$  na faixa de frequência de operação da antena proposta.

(a) Coeficiente de reflexão.



(b) Razão axial.

Fonte: o autor

Nota-se que, para as condições estudadas,  $u$  pode levar a uma piora na banda em  $|S_{11}|$  para valores maiores que  $0,061l_p$ , ficando próximo a 13% de  $0,04l_p$  até  $0,061l_p$ . Observa-se que nos limites estudados ( $0,04l_p$  e  $0,08l_p$ ) ocorre uma redução também na banda em AR. Destaca-se que  $u \cong 0,061l_p$ , mesmo não sendo situação em que ocorre o maior valor da banda de operação, garante que a antena opere, de forma conjunta em  $|S_{11}|$  e AR, o mais próximo possível dos limites desejados para o projeto (3,3GHz à 3,8GHz). Desse modo, esse valor, que é o apresentado na formulação matemática apresentada no Capítulo 3, é definido como o ideal nas condições estudadas para o projeto, sendo mantido para as análises realizadas na sequência do desenvolvimento.

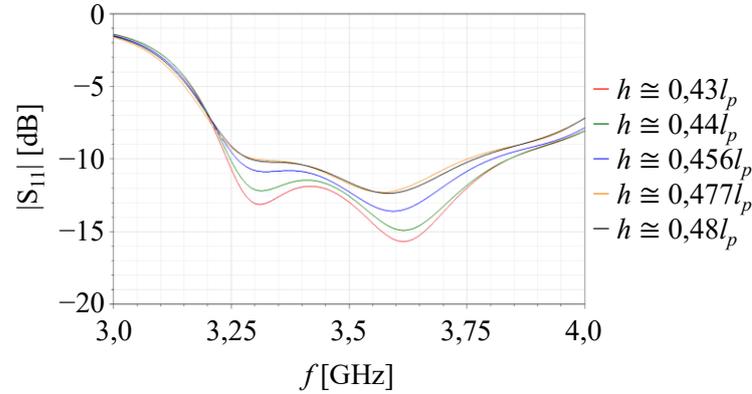
**Tabela 4.6: Bandas percentuais de operação do estudo da variável  $u$ .**

$u$ ( $l_p$ )	$Bw$ em $S_{11}$ (%)	$Bw$ em AR (%)
0,04	13,41 (3,20GHz à 3,66GHz)	7,01 (3,58GHz à 3,84GHz)
0,05	13,53 (3,24GHz à 3,71GHz)	16,44 (3,35GHz à 3,95GHz)
0,061	13,33 (3,29GHz à 3,76GHz)	17,33 (3,32GHz à 3,95GHz)
0,07	8,65 (3,43GHz à 3,74GHz)	8,70 (3,30GHz à 3,60GHz)
0,08	7,50 (3,48GHz à 3,75GHz)	7,56 (3,31GHz à 3,57GHz)

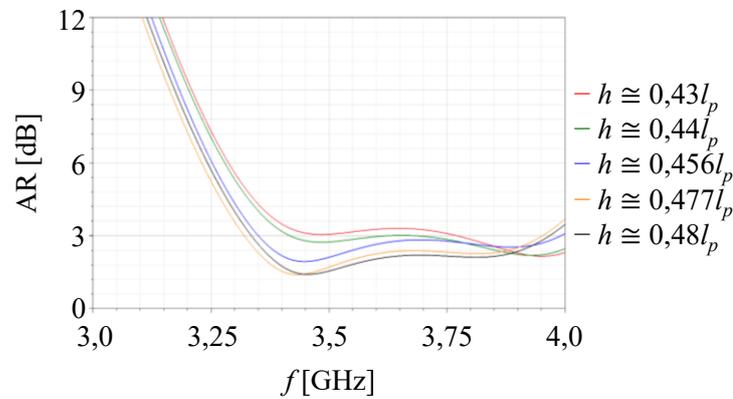
#### 4.2.7 Estudo da variável $h$

A sétima variável estudada foi a espessura  $h$  do laminado dielétrico. De acordo com a equação (3.1) tem-se originalmente  $h \cong 0,477l_p$ , então, estudou-se esse parâmetro variando de  $0,43l_p$  à  $0,48l_p$ . Novamente, simulou-se a geometria, analisando as respostas em frequência de  $|S_{11}|$  e AR (que também foi quantificada na direção de máxima irradiação,  $+z$ ), como mostrado na Figura 4.8. Na Figura 4.8(a) tem-se o estudo do impacto de  $h$  no  $|S_{11}|$ , enquanto, na Figura 4.8(b) tem-se o estudo do impacto de  $h$  em AR, impactos esses que são melhor visualizados na Tabela 4.7. Nota-se que, para as condições estudadas, a banda em  $|S_{11}|$  tende a ser maior quanto menor for o valor  $h$ , enquanto na banda em AR tem-se o efeito inverso. Destaca-se que para valores de  $h$  menores que  $0,46l_p$  a banda em  $|S_{11}|$  é capaz de abrigar todas as subfaixas do 5G de 3,3GHz à 3,8GHz, todavia, nessa condição o início da banda em AR fica comprometida. Observa-se que  $h \cong 0,456l_p$  e  $h \cong 0,477l_p$  são dois resultados interessantes. Em  $h \cong 0,456l_p$ , das 50 subfaixas do 5G no entorno de 3,5GHz, em  $|S_{11}|$  há cobertura em todas e em AR apenas as cinco primeiras não são atendidas. Em  $h \cong 0,477l_p$ , em  $|S_{11}|$  não há cobertura apenas nas quatro últimas subfaixas, enquanto em AR apenas as duas primeiras não são atendidas. Os dois resultados são similares, desse modo, optou-se por estudar o impacto das duas possibilidades junto à próxima variável analisada.

Figura 4.8 – Estudo do impacto da variável  $h$  na faixa de frequência de operação da antenna proposta.



(a) Coeficiente de reflexão.



(b) Razão axial.

Fonte: o autor

Tabela 4.7: Bandas percentuais de operação do estudo da variável  $h$ .

$h$ ( $l_p$ )	$Bw$ em $S_{11}$ (%)	$Bw$ em AR (%)
0,43	17,21 (3,24GHz à 3,85GHz)	7,41 (3,77GHz à 4,06GHz)
0,44	16,90 (3,25GHz à 3,85GHz)	16,87 (3,42GHz à 4,05GHz)*
0,456	15,56 (3,26GHz à 3,81GHz)	17,44 (3,35GHz à 3,99GHz)
0,477	13,33 (3,29GHz à 3,76GHz)	17,33 (3,32GHz à 3,95GHz)
0,48	13,90 (3,28GHz à 3,77GHz)	17,24 (3,34GHz à 3,97GHz)

\* Parte dessa extensão em frequência está levemente superior ao limite de AR.

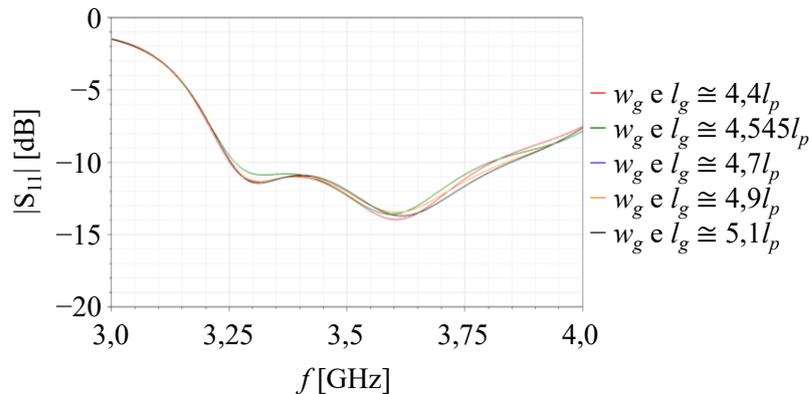
#### 4.2.8 Estudo das variáveis $l_g$ e $w_g$

A oitava variável estudada foi o comprimento  $l_g$  do plano de terra. Entretanto, é importante destacar que conforme a formulação da equação (3.1), a antenna apresenta plano de terra quadrado, ou seja,  $l_g = w_g$ . Desse modo, manteve-se essa relação e analisou-se o impacto conjunto de  $l_g$  e  $w_g$ . De acordo com a equação (3.1) tem-se originalmente  $l_g = w_g \cong 4,545l_p$ , então, estudou-se esse parâmetro variando de  $4,4l_p$  à  $5,1l_p$ . Novamente, simulou-se a geometria,

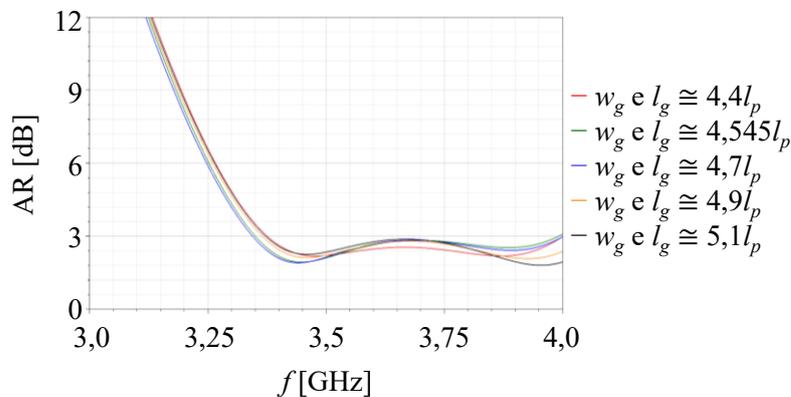
analisando as respostas em frequência de  $|S_{11}|$  e AR (que também foi quantificada na direção de máxima irradiação,  $+z$ ), como mostrado nas Figuras 4.9 (para  $h \cong 0,456l_p$ ) e 4.10 (para  $h \cong 0,477l_p$ ). Nas Figuras 4.9(a) e 4.10(a) tem-se o estudo do impacto de  $l_g$  e  $w_g$  no  $|S_{11}|$ , enquanto, nas Figuras 4.9(b) e 4.10(b) tem-se o estudo do impacto de  $l_g$  e  $w_g$  em AR, impactos esses que são mais bem visualizados na Tabela 4.8.

Analisando a banda em  $|S_{11}|$ , nota-se que, para as condições de  $l_g$  e  $w_g$  estudadas, quando  $h \cong 0,456l_p$  tem-se a banda cobrindo os limites estipulados para operação no 5G, enquanto, para  $h \cong 0,477l_p$  apenas quando  $l_g = w_g \cong 4,9l_p$  isso ocorre. Ao estudar a banda em AR, nas mesmas situações, observa-se que nas duas condições de  $h$  não se opera em toda faixa estipulada. Para  $h \cong 0,456l_p$  e  $l_g = w_g \cong 4,7l_p$  a banda vai além de 3,8GHz, porém, começa em 3,34GHz. Para  $h \cong 0,477l_p$  e  $l_g = w_g \cong 4,9l_p$  a banda ultrapassa 3,8GHz, porém, começa em 3,33GHz. Então, na primeira situação apenas quatro primeiras subfaixas do 5G não são atendidas, enquanto na segunda situação apenas as três primeiras não são atendidas.

**Figura 4.9 – Estudo do impacto das variáveis  $l_g$  e  $w_g$  na faixa de frequência de operação da antena proposta com  $h \cong 0,456l_p$ .**



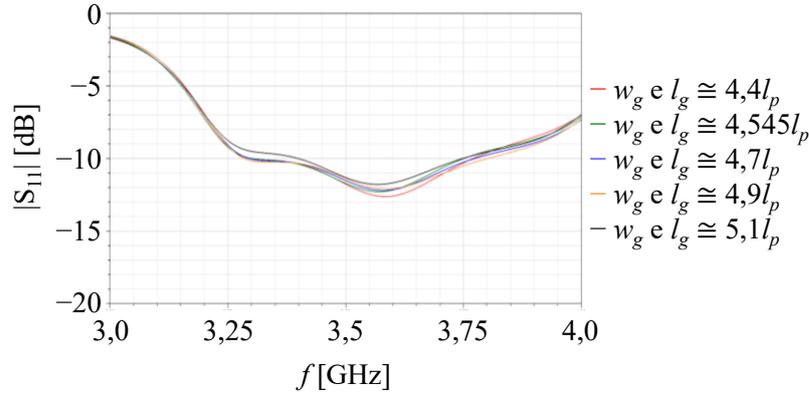
(a) Coeficiente de reflexão.



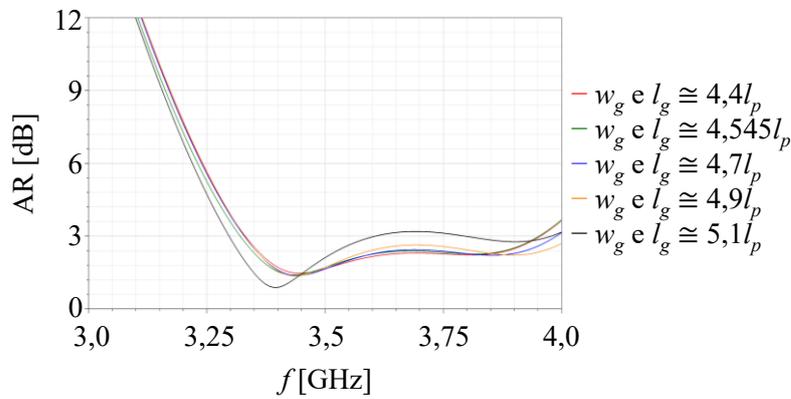
(b) Razão axial.

**Fonte: o autor**

Figura 4.10 – Estudo do impacto das variáveis  $l_g$  e  $w_g$  na faixa de frequência de operação da antena proposta com  $h \cong 0,477l_p$ .



(a) Coeficiente de reflexão.



(b) Razão axial.

Fonte: o autor

Tabela 4.8: Bandas percentuais de operação do estudo das variáveis  $l_g$  e  $w_g$ .

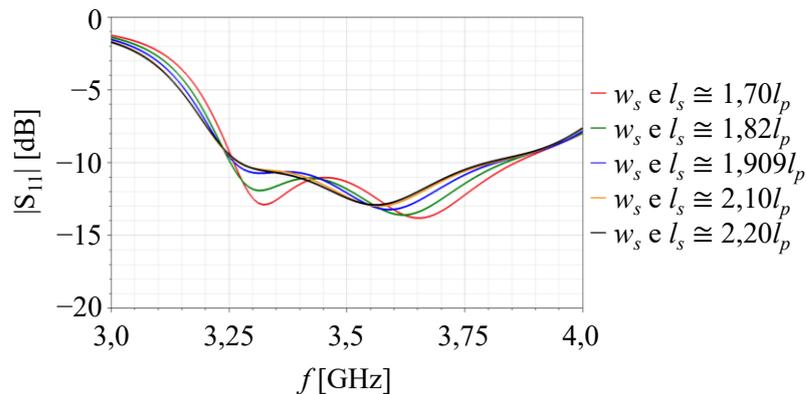
$w_g$ e $l_g (l_p)$	$Bw$ em $S_{11}$ (%)		$Bw$ em AR (%)	
	$h \cong 0,456l_p$	$h \cong 0,477l_p$	$h \cong 0,456l_p$	$h \cong 0,477l_p$
4,4	15,9 (3,25GHz à 3,81GHz)	13,9 (3,29GHz à 3,78GHz)	16,8 (3,38GHz à 4,00GHz)	17,3 (3,33GHz à 3,96GHz)
4,545	15,3 (3,26GHz à 3,80GHz)	13,3 (3,29GHz à 3,76GHz)	17,7 (3,35GHz à 4,00GHz)	17,3 (3,32GHz à 3,95GHz)
4,7	15,8 (3,26GHz à 3,82GHz)	13,9 (3,29GHz à 3,78GHz)	18,8 (3,34GHz à 4,00GHz)	18,0 (3,33GHz à 3,99GHz)
4,9	16,9 (3,25GHz à 3,85GHz)	15,0 (3,28GHz à 3,81GHz)	18,6 (3,37GHz à 4,06GHz)	18,0 (3,33GHz à 4,02GHz)
5,1	16,9 (3,25GHz à 3,85GHz)	10,0 (3,40GHz à 3,76GHz)	19,3 (3,37GHz à 4,09GHz)	19,0 (3,29GHz à 3,98GHz)

As configurações  $h \cong 0,456l_p$  e  $l_g = w_g \cong 4,7l_p$  e  $h \cong 0,477l_p$  e  $l_g = w_g \cong 4,9l_p$  são muito similares e promissoras, restando apenas o início da banda em AR a ser ajustado. Desse modo, optou-se também por estudar o impacto das duas possibilidades junto à próxima variável analisada.

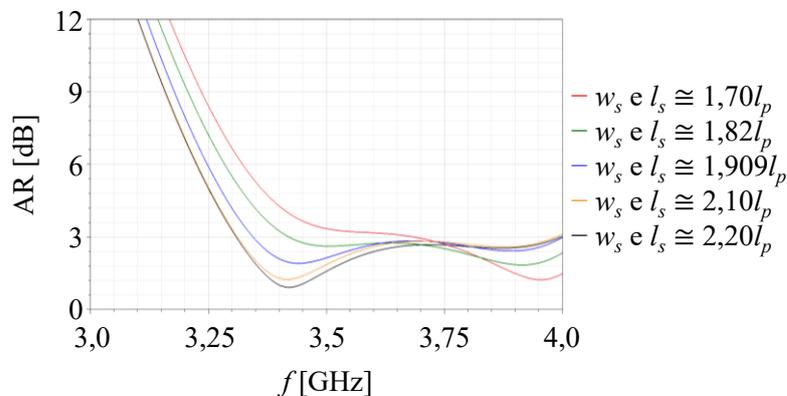
### 4.2.9 Estudo das variáveis $l_s$ e $w_s$

A nona variável estudada foi o comprimento  $l_s$  do substrato dielétrico. Entretanto, é importante destacar que conforme a formulação da equação (3.1), a antena apresenta laminado dielétrico quadrado, ou seja,  $l_s = w_s$ . Desse modo, manteve-se essa relação e analisou-se o impacto conjunto de  $l_s$  e  $w_s$ . De acordo com a equação (3.1) tem-se originalmente  $l_g = w_g \cong 1,909l_p$ , então, estudou-se esse parâmetro variando de  $1,7l_p$  à  $2,2l_p$ . Novamente, simulou-se a geometria, analisando as respostas em frequência de  $|S_{11}|$  e AR (que também foi quantificada na direção de máxima irradiação,  $+z$ ), como mostrado nas Figuras 4.11 (para  $h \cong 0,456l_p$  e  $l_g = w_g \cong 4,7l_p$ ) e 4.12 (para  $h \cong 0,477l_p$  e  $l_g = w_g \cong 4,9l_p$ ). Nas Figuras 4.11(a) e 4.12(a) e tem-se o estudo do impacto de  $l_s$  e  $w_s$  no  $|S_{11}|$ , enquanto, nas Figuras 4.11(b) e 4.12(b) tem-se o estudo do impacto de  $l_s$  e  $w_s$  em AR, impactos esses que são melhor visualizados na Tabela 4.9.

**Figura 4.11 – Estudo do impacto das variáveis  $l_s$  e  $w_s$  na faixa de frequência de operação da antena proposta com  $h \cong 0,456l_p$  e  $l_g = w_g \cong 4,7l_p$ .**



(a) Coeficiente de reflexão.



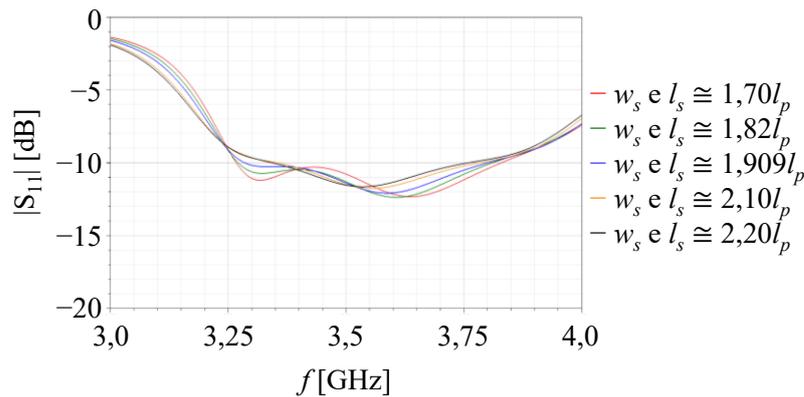
(b) Razão axial.

Fonte: o autor

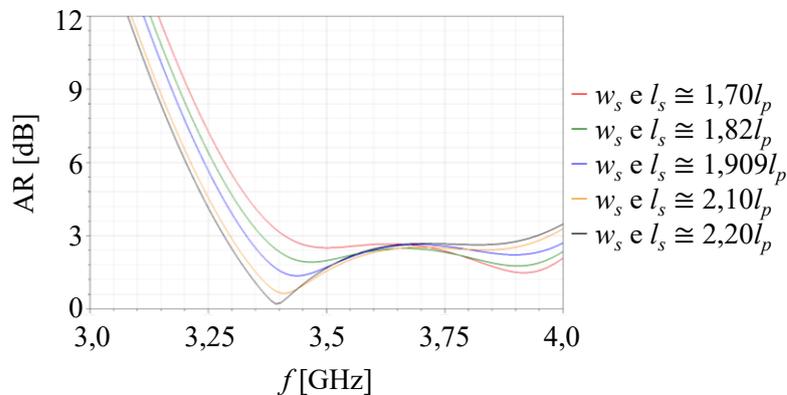
Analisando a banda em  $|S_{11}|$ , nota-se que, para as condições de  $l_s$  e  $w_s$  estudadas, quando  $h \cong 0,456l_p$  e  $l_g = w_g \cong 4,7l_p$  tem-se a banda cobrindo os limites estipulados para operação no 5G, enquanto, para  $h \cong 0,477l_p$  e  $l_g = w_g \cong 4,9l_p$  a partir de  $l_s = w_s \cong 2,0l_p$  não há cobertura para o início da faixa. Ao estudar a banda em AR, nas mesmas situações, observa-se que para valores de  $l_s$  e  $w_s$  próximos à  $1,7l_p$  ocorre uma piora nos resultados das duas condições estudadas. Aumentando  $l_s$  e  $w_s$  melhora-se a operação em AR nas duas condições, de modo que a partir de  $l_s = w_s \cong 2,1l_p$  para  $h \cong 0,456l_p$  e  $l_g = w_g \cong 4,7l_p$  a banda inicia-se em 3,31GHz além de 3,8GHz.

As configurações como  $l_s = w_s \cong 2,1l_p$  e  $l_s = w_s \cong 2,2l_p$  (para  $h \cong 0,456l_p$  e  $l_g = w_g \cong 4,7l_p$ ) são muito similares e promissoras, restando apenas o início da banda em AR a ser ajustado (apenas uma subfaixa do 5G). Desse modo, optou-se também por estudar o impacto das duas possibilidades junto às próximas variáveis analisadas.

**Figura 4.12 – Estudo do impacto das variáveis  $l_s$  e  $w_s$  na faixa de frequência de operação da antena proposta com  $h \cong 0,477l_p$  e  $l_g = w_g \cong 4,9l_p$ .**



(a) Coeficiente de reflexão.



(b) Razão axial.

**Fonte: o autor**

**Tabela 4.9: Bandas percentuais de operação do estudo das variáveis  $l_s$  e  $w_s$ .**

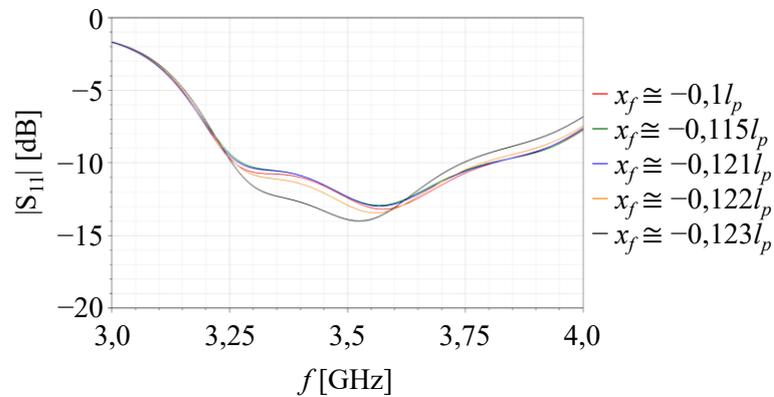
$w_s$ e $l_s (l_p)$	Bw em $S_{11}$ (%)		Bw em AR (%)	
	$h \cong 0,456l_p$ e $l_g \cong 4,7l_p$	$h \cong 0,477l_p$ e $l_g \cong 4,9l_p$	$h \cong 0,456l_p$ e $l_g \cong 4,7l_p$	$h \cong 0,477l_p$ e $l_g \cong 4,9l_p$
1,70	16,9 (3,26GHz à 3,86GHz)	15,8 (3,27GHz à 3,83GHz)	10,6 (3,68GHz à 4,09GHz)	17,4 (3,41GHz à 4,06GHz)
1,82	16,6 (3,25GHz à 3,84GHz)	15,2 (3,27GHz à 3,81GHz)	16,9 (3,42GHz à 4,05GHz)	18,6 (3,36GHz à 4,05GHz)
1,909	15,8 (3,26GHz à 3,82GHz)	14,7 (3,28GHz à 3,80GHz)	18,0 (3,34GHz à 4,00GHz)	19,0 (3,33GHz à 4,03GHz)
2,10	15,2 (3,27GHz à 3,81GHz)	12,1 (3,35GHz à 3,78GHz)	18,4 (3,31GHz à 3,98GHz)	18,4 (3,30GHz à 3,97GHz)
2,20	15,0 (3,27GHz à 3,80GHz)	11,8 (3,34GHz à 3,76GHz)	18,9 (3,31GHz à 4,00GHz)	18,5 (3,28GHz à 3,95GHz)

### 4.2.10 Estudo da variável $x_f$

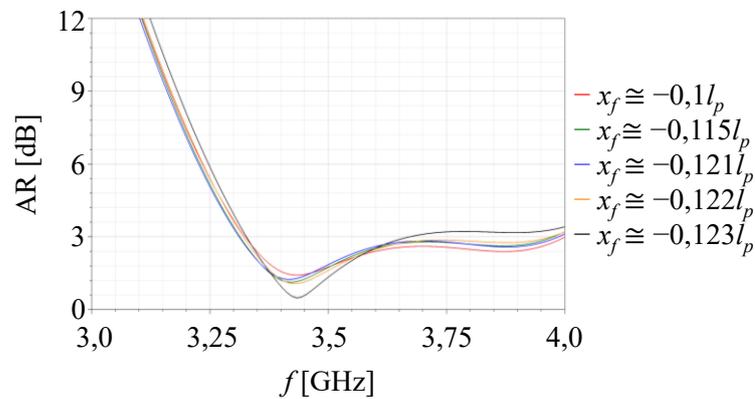
A décima variável estudada foi a posição  $x_f$  da sonda coaxial de alimentação. De acordo com a equação (3.1) tem-se originalmente  $x_f \cong -0,121l_p$ , então, estudou-se esse parâmetro variando de  $-0,1l_p$  à  $-0,123l_p$ . Todavia, é importante destacar que este estudo foi realizado em paralelo ao da posição  $y_f$  da sonda coaxial de alimentação (ao mesmo tempo, não analisando  $y_f$  a partir do término das análises de  $x_f$ ), que foi fixada em  $y_f \cong 0,174l_p$ , conforme descrito na equação (3.1). Novamente, simulou-se a geometria, analisando as respostas em frequência de  $|S_{11}|$  e AR (que também foi quantificada na direção de máxima irradiação,  $+z$ ), como mostrado nas Figuras 4.13 (para  $h \cong 0,456l_p$ ,  $l_g = w_g \cong 4,7l_p$  e  $l_s = w_s \cong 2,1l_p$ ) e 4.14 (para  $h \cong 0,456l_p$ ,  $l_g = w_g \cong 4,7l_p$  e  $l_s = w_s \cong 2,2l_p$ ). Nas Figuras 4.13(a) e 4.14(a) tem-se o estudo do impacto de  $x_f$  no  $|S_{11}|$ , enquanto, nas Figuras 4.13(b) e 4.14(b) tem-se o estudo do impacto de  $x_f$  em AR, impactos esses que são melhor visualizados na Tabela 4.10.

Analisando a banda em termos de coeficiente de reflexão, nota-se que, para as condições de  $x_f$  estudadas, para  $l_s = w_s \cong 2,1l_p$  e  $l_s = w_s \cong 2,2l_p$ , observa-se banda cobrindo os limites estipulados de 3,3GHz à 3,8GHz a partir de  $x_f \cong -0,121l_p$ . Em todos os valores anteriores  $x_f \cong -0,121l_p$  nota-se que o final da banda fica comprometido. Ao estudar a banda em termos de polarização circular, nas mesmas situações, observa-se que para  $l_s = w_s \cong 2,1l_p$  não há nenhuma condição em que a banda cobre os limites estipulados. Desse modo o estudo a partir de  $l_s = w_s \cong 2,1l_p$  não apresentou melhoras no funcionamento da antena. Entretanto, para  $l_s = w_s \cong 2,2l_p$  e  $x_f \cong -0,123l_p$  observa-se a operação em AR de 3,30GHz à 3,98GHz, ou seja, atendendo a métrica estipulada. Assim, como para essa mesma configuração a operação em  $|S_{11}|$  é de 3,28GHz à 3,81GHz, chegou-se a uma configuração onde todas as subfaixas do 5G e no entorno de 3,5GHz (descritas na Tabela 1.1) são atendidas. Assim, tem-se um primeiro modelo potencial para ser o final apresentado nesse trabalho.

Figura 4.13 – Estudo do impacto das variáveis  $x_f$  na faixa de frequência de operação da antena proposta com  $h \cong 0,456l_p$ ,  $l_g = w_g \cong 4,7l_p$  e  $l_s = w_s \cong 2,1l_p$ .



(a) Coeficiente de reflexão.



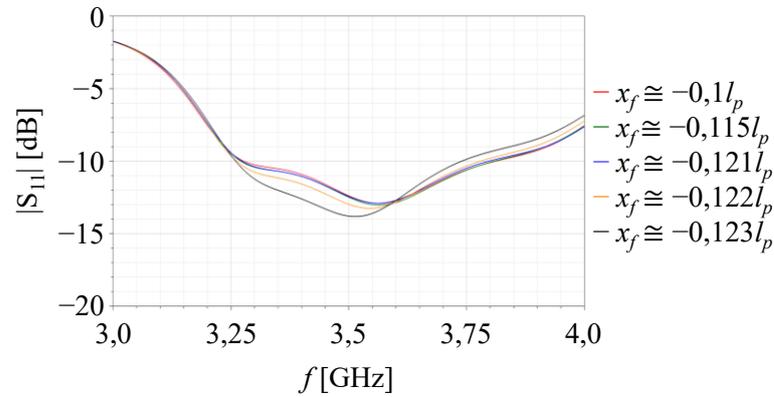
(b) Razão axial.

Fonte: o autor

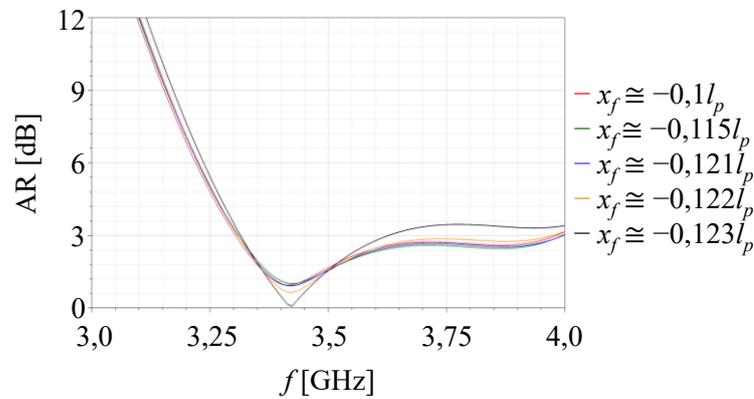
Tabela 4.10: Bandas percentuais de operação do estudo da variável  $x_f$ .

$x_f(l_p)$	Bw em $S_{11}$ (%)		Bw em AR (%)	
	$l_s = w_s \cong 2,1l_p$	$l_s = w_s \cong 2,2l_p$	$l_s = w_s \cong 2,1l_p$	$l_s = w_s \cong 2,2l_p$
-0,1	14,2 (3,26GHz à 3,76GHz)	13,7 (3,26GHz à 3,74GHz)	9,7 (3,33GHz à 3,67GHz)	9,2 (3,31GHz à 3,63GHz)
-0,115	15,0 (3,26GHz à 3,79GHz)	14,8 (3,26GHz à 3,78GHz)	17,8 (3,32GHz à 3,97GHz)	18,1 (3,31GHz à 3,97GHz)
-0,121	15,3 (3,27GHz à 3,81GHz)	15,0 (3,27GHz à 3,80GHz)	18,6 (3,31GHz à 3,99GHz)	18,9 (3,31GHz à 4,00GHz)
-0,122	14,7 (3,28GHz à 3,80GHz)	15,3 (3,27GHz à 3,81GHz)	18,4 (3,31GHz à 3,98GHz)	18,9 (3,31GHz à 4,00GHz)
-0,123	15,6 (3,26GHz à 3,81GHz)	15,0 (3,28GHz à 3,81GHz)	18,6 (3,32GHz à 4,00GHz)	18,7 (3,30GHz à 3,98GHz)

**Figura 4.14 – Estudo do impacto das variáveis  $x_f$  na faixa de frequência de operação da antena proposta com  $h \cong 0,456l_p$ ,  $l_g = w_g \cong 4,7l_p$  e  $l_s = w_s \cong 2,2l_p$ .**



(a) Coeficiente de reflexão.



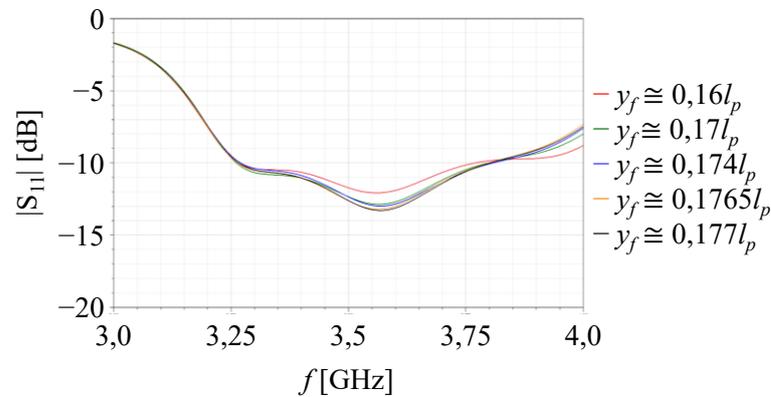
(b) Razão axial.

Fonte: o autor

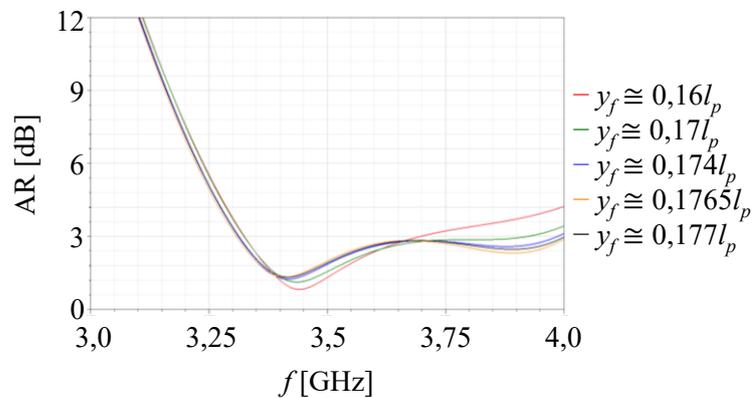
### 4.2.11 Estudo da variável $y_f$

A décima primeira variável estudada foi a posição  $y_f$  da sonda coaxial de alimentação. De acordo com a equação (3.1) tem-se originalmente  $y_f \cong 0,174l_p$ , então, estudou-se esse parâmetro variando de  $0,16l_p$  à  $0,177l_p$ . Todavia, é importante destacar que este estudo foi realizado em paralelo ao da posição  $x_f$  da sonda coaxial de alimentação (ao mesmo tempo, não analisando  $y_f$  a partir do término das análises de  $x_f$ ), que foi fixada em  $x_f \cong -0,121l_p$ , conforme descrito na equação (3.1). Novamente, simulou-se a geometria, analisando as respostas em frequência de  $|S_{11}|$  e AR (que também foi quantificada na direção de máxima irradiação,  $+z$ ), como mostrado nas Figuras 4.15 (para  $h \cong 0,456l_p$ ,  $l_g = w_g \cong 4,7l_p$  e  $l_s = w_s \cong 2,1l_p$ ) e 4.16 (para  $h \cong 0,456l_p$ ,  $l_g = w_g \cong 4,7l_p$  e  $l_s = w_s \cong 2,2l_p$ ). Nas Figuras 4.15(a) e 4.15(a) tem-se o estudo do impacto de  $y_f$  no  $|S_{11}|$ , enquanto, nas Figuras 4.15(b) e 4.16(b) tem-se o estudo do impacto de  $y_f$  em AR, impactos esses que são melhor visualizados na Tabela 4.11.

Figura 4.15 – Estudo do impacto das variáveis  $y_f$  na faixa de frequência de operação da antena proposta com  $h \cong 0,456l_p$ ,  $l_g = w_g \cong 4,7l_p$  e  $l_s = w_s \cong 2,1l_p$ .



(a) Coeficiente de reflexão.



(b) Razão axial.

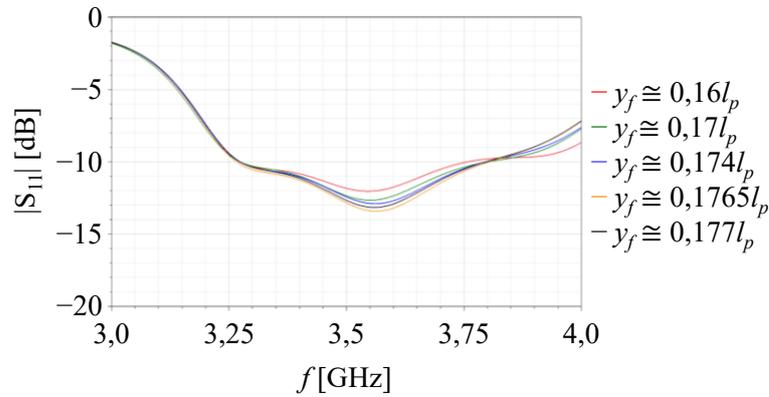
Fonte: o autor

Analisando a banda em termos de coeficiente de reflexão, nota-se que, para as condições de  $y_f$  estudadas, apenas para a configuração  $l_s = w_s \cong 2,2l_p$  e  $y_f \cong 0,16l_p$  não há cobertura em toda a banda, conforme os limites estipulados de 3,3GHz à 3,8GHz. Ao estudar a banda em termos de polarização circular, nas mesmas situações, observa-se que para  $l_s = w_s \cong 2,1l_p$  apenas quando  $y_f \cong 0,1765l_p$  os limites são atendidos, enquanto para  $l_s = w_s \cong 2,2l_p$  tem-se toda a banda estipulada sendo coberta para  $y_f \cong 0,17l_p$  e  $y_f \cong 0,177l_p$ . Assim, observa-se outras três configurações potenciais para operação em toda a largura de faixa do 5G no entorno de 3,5GHz.

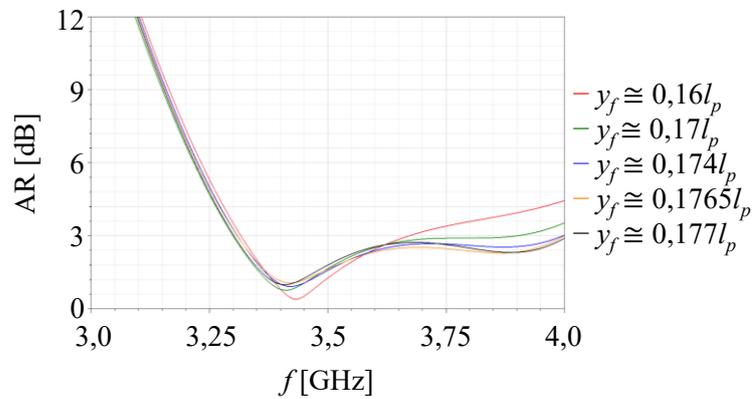
Tabela 4.11: Bandas percentuais de operação do estudo da variável  $y_f$ .

$y_f (l_p)$	Bw em $S_{11}$ (%)		Bw em AR (%)	
	$l_s = w_s \cong 2,1l_p$	$l_s = w_s \cong 2,2l_p$	$l_s = w_s \cong 2,1l_p$	$l_s = w_s \cong 2,2l_p$
0,16	14,2 (3,27GHz à 3,77GHz)	13,9 (3,32GHz à 3,67GHz)	10,6 (3,32GHz à 3,69GHz)	10,0 (3,32GHz à 3,67GHz)
0,17	15,3 (3,26GHz à 3,80GHz)	15,0 (3,27GHz à 3,80GHz)	16,6 (3,32GHz à 3,92GHz)	18,9 (3,30GHz à 3,99GHz)
0,174	15,2 (3,27GHz à 3,81GHz)	15,0 (3,27GHz à 3,80GHz)	18,6 (3,31GHz à 3,99GHz)	18,9 (3,31GHz à 4,00GHz)
0,1765	15,3 (3,26GHz à 3,80GHz)	15,0 (3,27GHz à 3,80GHz)	19,2 (3,30GHz à 4,00GHz)	18,9 (3,31GHz à 4,00GHz)
0,177	15,0 (3,27GHz à 3,80GHz)	15,0 (3,27GHz à 3,80GHz)	18,9 (3,31GHz à 4,00GHz)	19,2 (3,30GHz à 4,02GHz)

Figura 4.16 – Estudo do impacto das variáveis  $y_f$  na faixa de frequência de operação da antenna proposta com  $h \cong 0,456l_p$ ,  $l_g = w_g \cong 4,7l_p$  e  $l_s = w_s \cong 2,2l_p$ .



(a) Coeficiente de reflexão.



(b) Razão axial.

Fonte: o autor

### 4.3 Modelo final da antenna reprojeta para a faixa de 3,5GHz

Após todas as análises das variáveis que compõem a antenna, chegou-se a quatro configurações que atendem a operação de 3,3GHz à 3,8GHz, como mostrado na Tabela 4.12.

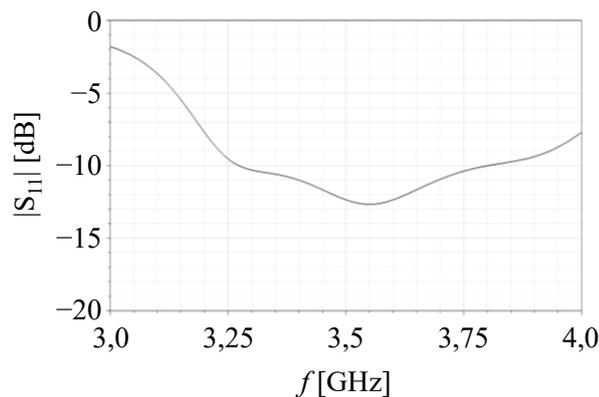
Tabela 4.12: Todas as configurações finais que atendem a banda.

Dimensões (mm)	Modelo 01	Modelo 02	Modelo 03	Modelo 04
$l_p/w_p$	19,75	19,75	19,75	19,75
$a$	3,56	3,56	3,56	3,56
$b$	14,06	14,06	14,06	14,06
$c$	11,51	11,51	11,51	11,51
$d$	3,89	3,89	3,89	3,89
$u$	1,20	1,20	1,20	1,20
$h$	9,00	9,00	9,00	9,00
$l_g/w_g$	92,83	92,83	92,83	92,83
$l_s/w_s$	43,45	43,45	41,48	43,45
$x_f$	-2,43	-2,40	-2,40	-2,40
$y_f$	+3,44	+3,36	+3,49	+3,50

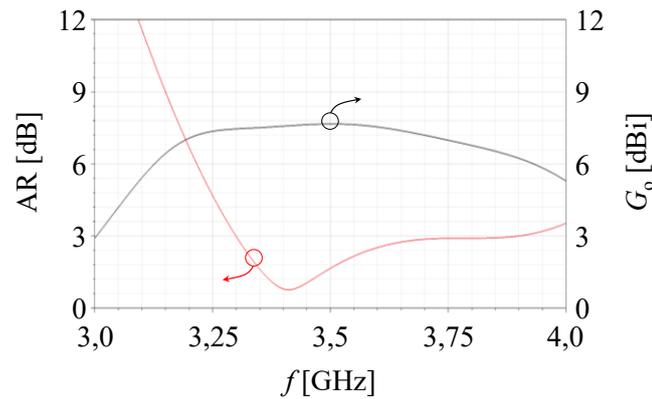
Com o intuito de apresentar um modelo final, escolheu-se uma das quatro configuração com as dimensões  $w_p = l_p \cong 19,75\text{mm}$ ,  $h \cong 0,456l_p \cong 9,00\text{mm}$ ,  $w_g = l_g \cong 4,7l_p \cong 92,83\text{mm}$ ,  $w_s = l_s \cong 2,2l_p \cong 43,45\text{mm}$ ,  $a \cong 0,18l_p \cong 3,56\text{mm}$ ,  $b \cong 0,712l_p \cong 14,06\text{mm}$ ,  $c \cong 0,583l_p \cong 11,51\text{mm}$ ,  $d \cong 0,197l_p \cong 3,89\text{mm}$ ,  $u \cong 0,061l_p \cong 1,2\text{mm}$ ,  $x_f \cong -0,121l_p \cong -2,4\text{mm}$  e  $y_f \cong 0,17l_p \cong 3,36\text{mm}$ . Nessas condições, nota-se que  $f_{\text{fenda}} \cong 3,13\text{GHz}$ ,  $f_{\text{TM10}} \cong 3,76\text{GHz}$  e  $f_{\text{TM01}} \cong 4,54\text{GHz}$ . Assim, tem-se a relação entre as frequências de ressonância  $f_{\text{TM10}}/f_{\text{fenda}} \cong 1,2$  e  $f_{\text{TM01}}/f_{\text{TM10}} \cong 1,2$ , de modo que se tem concordância no que o previsto em (10).

Os resultados isolados das respostas em frequência do  $|S_{11}|$ , AR e  $G_o$  do modelo com as variáveis otimizadas são mostrados nas figuras 4.17 e 4.18. É importante destacar novamente que AR e  $G_o$  foram quantificados na direção de máxima irradiação,  $+z$ . Observando a Figura 4.18(a), nota-se que o modelo reprojeto opera de 3,27GHz à 3,80GHz em termos de casamento de impedâncias, o que remete a uma banda percentual de aproximadamente 15,0%. Na Figura 4.1(b), nota-se que o modelo reprojeto opera de 3,30GHz à 3,99GHz em termos de polarização circular, o que remete a uma banda percentual de aproximadamente 18,9%. Ainda na da Figura 4.1(b), nota-se em toda a banda de operação a antena apresenta  $G_o \geq 6\text{dBi}$ , chegando à 7,7dBi em 3,5GHz. Analisando os resultados de  $|S_{11}|$  e AR fica claro que a banda real da antena (que contemple tanto casamento de impedância quanto polarização circular) é de 3,30GHz à 3,80GHz,  $Bw = 14,1\%$ . Assim, tem-se uma antena capaz de operar em todas as subfaixas do 5G no entorno de 3,5GHz.

**Figura 4.17 – Respostas de em frequência dos parâmetros de casamento de impedância e irradiação do modelo final da antena reprojeto para a faixa de 3,5GHz.**



(a) Coeficiente de reflexão.

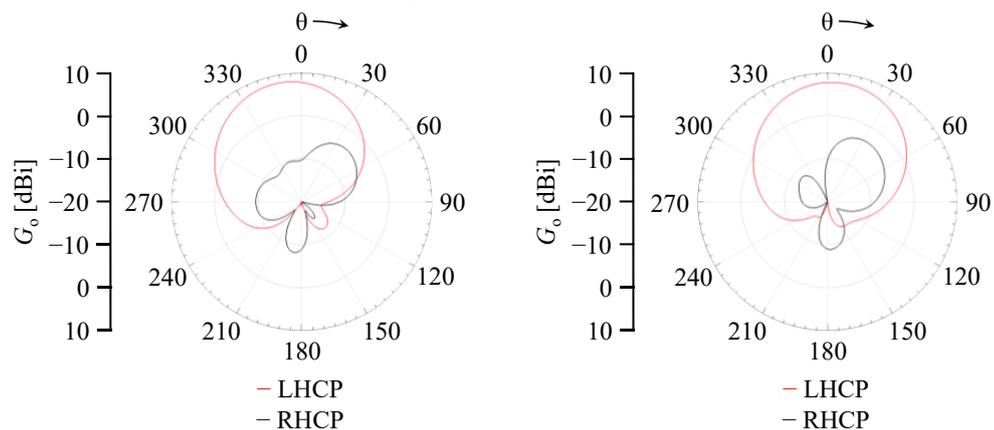


(b) Razão axial e ganho realizável.

Fonte: o autor

A Figura 4.18 apresenta o diagrama de irradiação para a antenna final na frequência de 3,5GHz, os planos  $xz$  (variando  $\theta$  com  $\varphi = 0^\circ$ ) e  $yz$  (variando  $\theta$  com  $\varphi = 90^\circ$ ). Primeiramente, assim como a antenna apresentada em (10), destaca-se que o formato da irradiação é muito similar ao observado em antenas de microfita retangulares alimentadas por sonda coaxial com polarização [5], de modo que as otimizações realizadas não trouxeram como consequência perturbações na irradiação. Outro fato importante, como mencionado na seção 2.3, a polarização observada é a circular à esquerda, LHCP, de modo que se observa alta rejeição de polarização circular à direita, RHCP.

Figura 4.18: Diagramas de irradiação de ganho realizável do modelo final da antenna proposta na frequência de 3,5 GHz.



Fonte: o autor

#### **4.4 Considerações finais**

Nesse capítulo foram apresentadas as análises e resultados da antena apresentada nesse trabalho. Assim, tem-se resultados que validam a proposta do trabalho. Acredita-se que além dos resultados observados, a sequência de desenvolvimento pode ser vista como uma importante contribuição, uma vez que possibilita que trabalhos futuros possam ser desenvolvidos a partir dessa geometria de antena.

# Capítulo 5

## CONCLUSÕES, CONTRIBUIÇÕES E TRABALHOS FUTUROS

---

---

### 5.1 Conclusões

Este projeto final de curso apresentou de forma detalhada as etapas de desenvolvimento de uma antena de microfita com fenda no formato de U assimétrico inserida no elemento ressonador para operação em banda larga com polarização circular na faixa de frequências de 3,5GHz.

No Capítulo 1 apresentou-se o tema do trabalho, bem como os objetivos a serem alcançados, além de uma breve definição sobre polarização de ondas eletromagnéticas e padronização de frequências do 5G. No Capítulo 2 mostrou-se as técnicas de projeto para a concepção da geometria proposta. No Capítulo 3 mencionou-se sobre os recursos e metodologias necessários para o desenvolvimento do trabalho. Neste capítulo foi proposta uma parametrização das dimensões da antena em função do comprimento do elemento irradiador para auxiliar no estudo das dimensões do projeto. No Capítulo 4 mostrou-se todo o desenvolvimento necessário para obter o modelo final da antena. Neste capítulo foi feita uma análise minuciosa de cada parâmetro de projeto e um ajuste fino para que a antena consiga cobrir toda a banda do 5G brasileiro.

Desse modo, a partir das informações apresentadas em todos esses capítulos chegou-se a uma antena capaz de operar em polarização circular cobrindo todos os blocos de operação do 5G brasileiro de 3,3GHz à 3,8GHz, com ganho realizável superior à 6dBi em toda a faixa.

Conclui-se que a partir de todas as informações descritas foram atendidos os objetivos esperados para esse projeto final de curso. Assim, tem-se a apresentação de uma antena que para ser desenvolvida engloba vários conceitos de curso de Engenharia Eletrônica e de Telecomunicações.

## **5.2 Propostas para a continuação do trabalho**

O trabalho apresentou uma antena com características potenciais para operação em redes 5G no entorno de 3,5GHz. Entretanto, essa geometria pode ser usada em outras faixas do 5G ou mesmo em outras aplicações. Então, tendo em vista eventual necessidade dessa antena apresentar uma largura de faixa ainda maior, propõem-se para trabalhos futuros analisar o projeto em laminados dielétricos com outros valores de permissividade dielétrica relativa.

# REFERÊNCIAS

---

- [1] S. HENRY, A. ALSOHAILY, E. S. SOUSA. 5G is Real: Evaluating the Compliance of the 3GPP 5G New Radio System with the ITU IMT-2020 Requirements, *IEEE Access*, vol. 8, pp 42828-42840, 2020.
- [2] E. DAHLAMN, S. PARKALL, J. SKOLD. 5G NR: The Next Generation Wireless Access Technology. 2. ed., Elsevier Ltd, 2021.
- [3] AGÊNCIA NACIONAL DE TELECOMUNICAÇÕES, Resolução nº 742, de 01 de março de 2021. Disponível em: <https://informacoes.anatel.gov.br/legislacao/resolucoes/2021/1512-resolucao-742>. Acesso em: 03 fev. 2024
- [4] P. POURMOHAMMADI ET AL. A Single-Layer Compact Wideband Circularly Polarized Patch Array for 5G Communications, *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 22, no. 4, pp 754-758, Abril de 2023.
- [5] C. A. BALANIS. Antenna Theory: Analysis and Design. 3. ed., New York: John Wiley and Sons, 2005.
- [6] D. J. BISHARAT, S. LIAO, Q. XUE. High Gain and Low Cost Differentially Fed Circularly Polarized Planar Aperture Antenna for Broadband Millimeter-Wave Applications, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 64, no. 1, pp 33-42, Janeiro de 2016.
- [7] B. FENG, L. LI, K. L. CHUNG, Y. LI. Wideband Widebeam Dual Circularly Polarized Magnetolectric Dipole Antenna/Array with Meta-Columns Loading for 5G and Beyond, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 69, no. 1, pp 219-228, Janeiro de 2021.
- [8] Y. ZHANG, L. PANG, X. LIANG, X. LIU, R. CHEN, J. LI. Propagation Characteristics of Circularly and Linearly Polarized Electromagnetic Waves in Urban Macrocell Scenario, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 64, no. 1, pp 209-222, Janeiro de 2015.
- [9] ANSYS ELECTRONICS DESKTOP. Disponível em: <https://www.ansys.com/products/electronics>. Acesso em: 01, abril 2024.
- [10] J. ZENG, X. LIANG, L. HE, F. GUAN, F. H. LIN, J. ZI. Single-Fed Triple-Mode Wideband Circularly Polarized Microstrip Antennas Using Characteristic Mode Analysis, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 70, no. 2, pp 846-855, Fevereiro de 2022.
- [11] K. -F. TONG AND T. -P. WONG. Circularly Polarized U-Slot Antenna, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 55, no. 8, pp 2382-2385, Agosto de 2007.
- [12] Y. CHEN, C. -F. WANG. Characteristic-Mode-Based Improvement of Circularly Polarized U-Slot and E-Shaped Patch Antennas, *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 11, pp 1474-1477, 2012.

- [13] M. KHAN, D. CHATTERJEE, Characteristic Mode Analysis of a Class of Empirical Design Techniques for Probe-Fed, U-Slot Microstrip Patch Antennas, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 64, no. 7, pp 2758-2770, Jullho de 2016.
- [14] J. J. BORCHARDT, T. C. LAPOINTE, U-Slot Patch Antenna Principle and Design Methodology Using Characteristic Mode Analysis and Coupled Mode Theory, *IEEE Access*, vol. 7, pp 109375-109385, 2019.
- [15] R. J. GARBACZ. Modal expansions for resonance scattering phenomena, *Proceedings of the IEEE*, vol. 53, no. 8, pp 856-864, Agosto de 1965.
- [16] J. JAIVERDHAN, M. M. SHARMA, R. P. YADAV, R. DHARA. Characteristic Mode Analysis and Design of Broadband Circularly Polarized CPW-Fed Compact Printed Square Slot Antenna, *Progress in Electromagnetics Research M*, Vol. 94, pp 105-118, Jullho de 2020.
- [17] T. S. BIRD. Definition and Misuse of Return Loss [Report of the Transactions Editor-in-Chief], *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 51, no. 2, pp 166-167, Abril de 2009.