

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA

ENGENHARIA ELETRÔNICA E DE TELECOMUNICAÇÕES

CAMPUS PATOS DE MINAS

MATHEUS ALVES FERREIRA

**ANTENA DE MICROFITA DE ALTO GANHO E POLARIZAÇÃO DUPLA PARA
OPERAÇÃO EM REDES CELULARES 5G**

Patos de Minas - MG
2022

MATHEUS ALVES FERREIRA

**ANTENA DE MICROFITA DE ALTO GANHO E POLARIZAÇÃO DUPLA PARA
OPERAÇÃO EM REDES CELULARES 5G**

Trabalho de Conclusão 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
2023

MATHEUS ALVES FERREIRA

**ANTENA DE MICROFITA DE ALTO GANHO E POLARIZAÇÃO DUPLA PARA
OPERAÇÃO EM REDES CELULARES 5G**

Trabalho de Conclusão 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

Aprovado em ____ de _____ de 2022.

Membros da Banca:

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

Prof. Dr. Davi Sabbag Roveri
(Membro interno – FEELT – UFU)

Prof.^a Dr.^a Elise Saraiva
(Membro interno – FEELT – UFU)

Patos de Minas – MG
2023

AGRADECIMENTO

Agradeço primeiramente a Deus por ter me dado a oportunidade de frequentar um bom curso numa boa Universidade apesar de todas as dificuldades enfrentadas nessa jornada.

Agradeço a minha mãe pelo auxílio a todo momento, independente da situação. Sem seu apoio eu não estaria aqui.

Ao meu orientador Prof. Dr. Renan Alves dos Santos por toda orientação e dedicação e também pela compreensão e paciência ao longo dessa etapa.

Aos colegas de curso que convivi durante a graduação.

A Universidade Federal de Uberlândia - Campus Patos de Minas e ao seu corpo docente, pelo ensino de alta qualidade e auxílio prestados.

A todos, meu muito obrigado!

RESUMO

Neste trabalho de conclusão de curso apresenta-se o projeto de uma antena de microfita de alto ganho e polarização dupla para operação em redes celulares de quinta geração (5G) nas faixas de frequência de 3,5GHz. Para tal, tem-se o projeto baseado em uma antena de microfita formada pela sobreposição de modo original de dois elementos ressonadores retangulares, com adição de quatro fendas retangulares simétricas (duas em cada ressonador). Além disso, a antena opera no modo de quinta ordem (TM_{500}) e é alimentada por duas sondas coaxiais, sendo cada um responsável pela excitação em uma polarização. A eficácia desta antena é validada a partir de resultados de análises eletromagnéticas, que atestam o bom desempenho, de modo que o modelo proposto é tido como contribuição em termos de antenas aplicada às redes celulares 5G.

Palavras-chave: 5G, antena de microfita, alto ganho, polarização dupla.

ABSTRACT

This final paper presents the high gain microstrip antenna design with dual polarization for operation in fifth generation cellular networks (5G) in the 3.5GHz frequency bands. For this, the design is based on a microstrip antenna formed by superimposing two rectangular patches, with the addition of four symmetrical rectangular slots (two in each patch). Furthermore, the antenna operates in fifth order mode (TM₅₀₀) and is fed by two coaxial probes, each one responsible for excitation in one polarization. The effectiveness of this antenna is validated based on the results of electromagnetic analysis, which attest to its good performance, so that the proposed model is seen as a contribution in terms of antennas applied to 5G cellular networks.

Keywords: 5G, microstrip antenna, high gain, dual-polarization.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Ilustração do artigo de referência.....	20
Figura 2.2 – Análise da distribuição de modos no substrato dielétrico.....	22
Figura 2.3 – Diagramas de irradiação da antena de microfita operando no modo TM ₅₀₀	24
Figura 2.4 – Ilustração da polarização das antenas de microfita retangulares em função da alimentação.....	25
Figura 2.5 – Coeficiente de reflexão em função da frequência da antena do artigo de referência principal.....	26
Figura 2.6 – Ganho na direção de máxima irradiação em função da frequência da antena do artigo de referência principal.....	27
Figura 2.7 – Diagramas de irradiação da antena do artigo de referência principal.....	28
Figura 4.1 – Coeficiente de reflexão em função da frequência da antena apenas com as dimensões recalculadas para a faixa de 3,5GHz.....	33
Figura 4.2 – Ganho na direção de máxima irradiação em função da frequência da antena apenas com as dimensões recalculadas para a faixa de 3,5GHz.....	33
Figura 4.3 – Diagramas de irradiação da antena apenas com as dimensões recalculadas para a faixa de 3,5GHz.....	34
Figura 4.4 – Coeficiente de reflexão em função da frequência da antena com a posição da alimentação ajustada.....	36
Figura 4.5 – Coeficiente de reflexão em função da frequência da antena com a posição da alimentação e o comprimento do ressonador ajustados.....	37
Figura 4.6 – Ganho na direção de máxima irradiação em função da frequência da antena com a posição da alimentação e o comprimento do ressonador ajustados.....	37
Figura 4.7 – Diagramas de irradiação da antena com a posição da alimentação e o comprimento do ressonador ajustados.....	38

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Valores das variáveis da antena do artigo de referência.....	19
Tabela 4.1 – Valores das variáveis da antena apenas com as dimensões recalculadas para a faixa de 3,5GHz.....	32
Tabela 4.2 – Valores das variáveis da antena apenas com as dimensões otimizadas para atender as métricas de projeto.	36

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

1G	Primeira geração de redes de celulares
2G	Segunda geração de redes de celulares
3G	Terceira geração de redes de celulares
4G	Quarta geração de redes de celulares
5G	Quinta geração de redes de celulares
3GPP	<i>3rd Generation Partnership Project</i>
ITU	<i>International Telecommunication Union</i>
NR	<i>New Radio</i>
eMBB	<i>Enhanced Mobile Broadband</i>
URLLC	<i>Ultra Reliable Low Latency</i>
mMTC	<i>Massive Machine type Communication</i>
eRAC	<i>Enhanced Remote Area Communications</i>
dbi	Decibéis em relação a antena isotrópica
ANATEL	Agência Nacional de Telecomunicações
TM	Onda Transversal Magnética
TE	Onda Transversal Elétrica
ϵ_r	Permissividade dielétrica
TM₁₀₀	Modo de operação fundamental
TM₅₀₀	Modo de operação de quinta ordem
f_r	Frequência de ressonância
tan(δ)	Tangente de perdas
W	Largura do elemento ressonador
L	Comprimento do elemento ressonador
W	Largura do componente ressonador
Wd	Largura do dielétrico
Ld	Comprimento do dielétrico
Lp	Distância da posição de alimentação
Ws	Largura da fenda
Ls	Comprimento da fenda
Ds	Distância entre as fendas

<i>h</i>	Altura do Dielétrico
HFSS	High Frequency Structure Simulator
FEM	Método de elementos finitos

SUMÁRIO

Capítulo 1.....	12
Conceitos Introdutórios.....	12
1.1 Introdução.....	12
1.2 Problematização.....	14
1.3 Tema do projeto.....	15
1.4 Objetivos.....	16
1.4.1 Objetivo geral.....	16
1.4.2 Objetivos específico.....	16
1.5 Justificativas.....	17
1.6 Considerações finais.....	17
Capítulo 2	18
Referencial teórico.....	18
2.1 Considerações iniciais.....	18
2.2 Antena de microfita com polarização dupla operando no modo TM ₅₀₀ com fendas no elemento ressonador.....	18
2.3 Considerações finais.....	28
Capítulo 3	29
Materiais e métodos.....	29
3.1 Considerações iniciais.....	29
3.2 Metodologia de desenvolvimento.....	29
3.3 Recursos necessários.....	29
3.4 Considerações finais.....	30
Capítulo 4	31
Resultados e discussões.....	31
4.1 Considerações iniciais.....	31
4.2 Antena apenas com as dimensões recalculadas para a faixa de 3,5GHz.....	31
4.3 Antena apenas com as dimensões otimizadas para atender as métricas de projeto.....	35
4.4 Considerações finais.....	39
Capítulo 5	40
Conclusões, Contribuições e Trabalhos Futuros.....	40
5.1 Conclusões.....	40
5.2 Propostas para a continuação do trabalho.....	41

Capítulo 1

Conceitos Introdutórios

Neste capítulo são apresentados os conceitos introdutórios deste trabalho. Inicialmente, descrevem-se as motivações para o estudo proposto. Em seguida, demonstra-se quais objetivos de espera alcançar. Por fim, a forma com que o trabalho é estruturado.

1.1 Introdução

As telecomunicações (ato de se comunicar a distância) é algo intrínseco na natureza do ser humano, sendo algo que está em constante evolução para atender as necessidades de uma sociedade completamente dinâmica. Um grande exemplo disso são as comunicações móveis (que permitiram a comunicação mesmo em deslocamento) que surgiram e se modificaram em quatro gerações nas últimas quatro décadas (1).

As quatro primeiras gerações de comunicações móveis (conhecidas popularmente como 1G, 2G, 3G e 4G) evoluíram da transmissão de apenas de sinais analógicos de voz para acesso banda larga (de sinais digitais) com taxas de dados de pico de até aproximadamente 100Mbps para acesso móvel de alta mobilidade e até aproximadamente 1Gbps para acesso de baixa mobilidade (2). Entretanto, a necessidade não apenas de conectividade de alta velocidade (que sem dúvidas é uma necessidade), mas de uma ampla gama de novos serviços previstos para serem habilitados pelas futuras comunicações móveis, levou ao desafio de propor a quinta geração da telefonia móvel celular (5G) (1).

As discussões sobre o 5G começaram por volta de 2012 e, ao longo de mais de uma década padrões estipulados e normas sendo criadas por agências internacionais como o 3GPP (do inglês *3rd Generation Partnership Project*) (3) e ITU (do inglês *International Telecommunication Union*) (4). Dentro desse contexto, nos anos de 2017, 2018 e 2020 foram definidos importantes conceitos sobre essa nova tecnologia. Em 2017 o 3GPP apresentou o primeiro conjunto de especificações (com finalidade descrever de modo inicial a tecnologia) sobre o 5G (5). Nessas especificações eram descritas características de sistemas de rádio 5G não autônomos integrados em redes 4G. Assim, demonstra-se uma evolução, porém, não o “5G puro”. Em 2018 o 3GPP em seu *Release 15* descreveu o primeiro conjunto completo de padrões 5G (6). Nesses padrões foi descrita a cobertura autônoma do 5G, criando um novo

sistema de rádio, denominado como 5G NR (do inglês *New Radio*). Em 2020 o 3GPP apresentou no *Release 16* a segunda fase da padronização do 5G NR (7). As características descritas no *Release 16* foram submetidas a ITU, que por sua vez redigiu orientações sobre as características do 5G NR para serem repassadas às sociedades internacionais de telecomunicações, em um documento denominado IMT-2020 (8).

Os documentos apresentados pelo 3GPP e validados pela ITU descrevem três cenários de aplicações para o 5G NR (1): alta vazão de dados para os dispositivos móveis (eMBB do inglês *Enhanced Mobile Broadband*), comunicação de baixa latência e ultra confiável (URLLC do inglês *Ultra Reliable Low Latency*) e comunicação massiva entre máquinas (mMTC do inglês *massive Machine Type Communication*). É importante destacar que além desses, alguns países, dos quais o Brasil faz parte, a partir de novos estudos estão propondo um quarto cenário, destinado ao acesso de longo alcance em áreas remotas (eRAC do inglês *enhanced Remote Area Communications*) (9).

Para contextualizar, pode-se explicar de modo resumido os quatro cenários citados para o 5G NR como:

- (A) O eMBB apresenta os cenários de 5G NR voltados aos serviços que requerem alta taxa de dados (10). Nesse caso, tem-se a evolução natural do 4G, em que os usuários estão conectados a todo momento em aplicações como, por exemplo, *streaming* de vídeo ou jogos *online*.
- (B) O mMTC apresenta os cenários de 5G NR voltados aos serviços onde tem-se grande número de dispositivos conectados à rede, no qual não necessariamente é necessário grandes taxas de dados (11). Destaca-se nesse caso aplicações onde é observado um elevado número de sensores coletando dados em uma rede Internet das Coisas (IoT do inglês *Internet of Things*).
- (C) O URLLC apresenta os cenários de 5G NR voltados aos serviços que requerem baixa latência e ultra confiabilidade na comunicação (12). Destaca-se nesse caso aplicações de internet tátil, por exemplo em cirurgias remotas.
- (D) O eRAC apresenta os cenários de 5G NR voltados aos serviços em que se tenha qualidade de conexão em áreas remotas ou rurais (9). Destaca-se nesse caso aplicações de automatização no campo, por exemplo, na agricultura de precisão ou 4.0.

O documento IMT-2020 (8) apresenta informações sobre estrutura das células transmissoras (em diversos cenários), características de transmissores e receptores (potência de transmissão, largura de banda, ganho de antenas, entre outros), densidade de usuários por

células (em diversos cenários), modelos de propagação (em diversos cenários), entre outros. Esse documento também apresenta estudos em algumas frequências de operação do 5G NR, entretanto, esse parâmetro é variável, sendo dependente da política de alocação de órgãos responsáveis de cada país. Por exemplo, no Brasil a Agência Nacional de Telecomunicações (Anatel) já definiu as faixas que serão alocadas (13), dentre as quais destacam-se as bandas de 3,5GHz e 26GHz.

1.2 Problematização

O 5G envolve muitas áreas de atuação. A tecnologia não se trata apenas da evolução da rede 4G, mas sim da criação de novos serviços de telecomunicações. Por esse motivo, tem-se muitas áreas de trabalho, das quais pode-se citar projetos de dispositivos de radiofrequência e micro-ondas. Todavia, é importante destacar que cada cenário pode requerer projetos de dispositivos com características específicas.

Dentre os inúmeros dispositivos de radiofrequência e micro-ondas que podem ser desenvolvidos para as novas redes 5G NR destacam-se as antenas. Antenas é um elemento eletromagnético que atua convertendo um sinal guiado em onda eletromagnética no espaço ilimitado e vice-versa. Por esse motivo, a qualidade das conexões 5G NR passam pelas características específicas das antenas em uso.

Existem muitos estudos e projetos de antenas aplicadas ao 5G NR. Dentre elas pode-se destacar os modelos com polarização dupla ou circular. É importante destacar que na propagação no canal rádio a polarização da onda eletromagnética pode ser alterada devido a reflexões, difrações ou passagem de estruturas físicas. Por isso, devido a necessidade de alta confiabilidade que a nova rede requer (principalmente em cenários como o URLLC), antenas com polarização linear podem ser um limitante. Antenas com polarização linear só captam (com a máxima intensidade possível) a onda que incide sobre elas com a mesma polarização que elas apresentam. Isso é descrito pelo conceito de rejeição de polarização (14). Assim, em diversas situações, o 5G NR só terá o correto funcionamento se antenas utilizadas apresentarem polarização dupla ou circular, o que reduz (em alguns casos até anulam) os efeitos da de rejeição de polarização.

Dada a importância das antenas com polarização dupla ou circular para as redes 5G NR, fazendo um breve levantamento bibliográfico a respeito do tema, podendo destacar:

- (A) Em 2020, B. Feng *et al.* apresentaram uma rede antena com polarização dupla com alto ganho (25,8dBi) para aplicações em 5G NR em de onda milimétrica (36GHz à 44GHz) (15). Vale destacar que a estrutura é composta por uma rede

8×8 de antenas de cavidade em substrato integrado. A rede com essa configuração justifica os valores de ganhos tão altos quanto 25,8dBi.

- (B) Em 2020, A. Li *et al.* apresentaram uma rede antena com polarização dupla com alto ganho (11,6dBi) para aplicações em 5G NR de onda milimétrica (25GHz à 31GHz) (16). Vale destacar que a estrutura é composta por uma rede linear de 4 de antenas Yagi-Uda em substrato integrado.
- (C) Em 2021, X. Tong *et al.* apresentaram uma rede antena com polarização dupla com ganho de até 8,9dBi para aplicações em 5G NR de onda milimétrica (24GHz à 30GHz) (17). Vale destacar que a estrutura é composta por uma rede linear de 4 de antenas de microfita elípticas empilhadas alimentadas por uma matriz *Butler*.
- (D) Em 2022, D. Yang *et al.* apresentaram uma antena com polarização dupla com ganho de até 8,2dBi para aplicações em 5G NR em de onda milimétrica (2,78GHz à 4,26GHz) (18). Vale destacar que a estrutura é composta por uma antena Dipolo Magneto-Elétrica (um tipo de antena de microfita quadrada suspensa e com quatro portas de alimentação).

Conforme o breve levantamento bibliográfico apresentado, nota-se que existe muito interesse em antenas com polarização dupla para aplicações em redes celulares 5G NR. Destaca-se diversas configurações (modelos) de antenas para atender essa característica, desde estruturas mais simples até as mais complexas (muitas vezes formadas por redes de antenas).

1.3 Tema do projeto

Tendo em vista a importância de antenas com polarização dupla para as redes celulares 5G NR, o tema deste trabalho refere-se ao projeto numérico (em ambiente de simulação eletromagnética) de uma antena com essa característica. Para tal, tendo em vista a métrica de se obter uma antena simples e compacta, tem-se como referência principal o trabalho apresentado por Y. He *et al.* em 2018 (19). Esse artigo apresenta uma antena de microfita de alto ganho (com valor de pico de 11,5dBi) operando em um modo de alta ordem (modo transversal magnético de quinta ordem, ou simplesmente TM_{500}). Vale destacar que a antena em questão não foi projetada para as faixas de frequência do 5G NR, sendo desenvolvida para a faixa de 5,88 à 6,06GHz. Desse modo, nesse trabalho tem-se como métrica principal reprojeter essa estrutura para operar no entorno de 3,5GHz (banda licenciada para o 5G no Brasil).

1.4 Objetivos

Os objetivos deste trabalho de conclusão são divididos em geral e específicos. Os objetivos gerais estão ligados ao projeto da antena de microfita de dupla polarização para operação em redes celulares 5G NR na faixa de 3,5GHz. Os objetivos específicos estão ligados às atividades desenvolvidas ao longo do trabalho para que o projeto seja executado.

1.4.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é projetar uma antena de microfita de dupla polarização para operação em redes celulares 5G NR na faixa de 3,5GHz tendo como referência principal o trabalho (19). Para tal, tem-se como métrica principal que o ganho na direção de máxima irradiação (para a frequência de 3,5GHz) de ao menos 11,5dBi (valor do artigo de referência) e que em toda a banda seja de ao menos 10dBi (valores do artigo de referência).

1.4.2 Objetivos específico

Os objetivos específicos deste trabalho podem ser divididos em:

- (A) Estudo teórico (com base em livros e artigos) das antenas de microfita retangulares, principalmente técnicas de projetos para a operação modo TM_{500} e a operação com polarização.
- (B) Projeto numérico da microfita com dupla polarização do artigo (19). Basicamente, em um primeiro momento é feito a reprodução do artigo de referência para compreender seus resultados, tendo como parâmetros a serem analisados:
 - i. Largura de banda a partir do coeficiente de reflexão.
 - ii. Ganho em função da frequência.
 - iii. Diagramas de irradiação em planos específicos.
- (C) Projeto numérico da microfita com dupla polarização para operação em redes celulares 5G NR na faixa de 3,5GHz. Após validar a antena do artigo de referência, em um segundo momento é feito o reprojeito da estrutura para operar na faixa de 3,5GHz. Para tal, além da mudança da faixa de frequência é modificado as características do substrato dielétrico (do F4B com permissividade dielétrica relativa $\epsilon_r = 2,55$ e tangente de perdas $\tan(\delta) = 0,001$ para o RT/duroid® 5880 com permissividade dielétrica relativa $\epsilon_r = 2,2$ e tangente de perdas $\tan(\delta) = 0,0009$) com o objetivo de diminuir as perdas dielétricas do substrato, aumentando a eficiência de

irradiação e consequentemente o ganho da antena. O funcionamento da antena reprojeta e é avaliado a partir da:

- i. Análise da largura de banda a partir do coeficiente de reflexão.
- ii. Análise do ganho em função da frequência.
- iii. Análise de diagramas de irradiação em planos específicos.

1.5 Justificativas

O 5G NR representa uma grande evolução (até mesmo quebra de paradigmas) na forma de se comunicar. Entretanto, o seu desenvolvimento e implementação apresentam grandes desafios a serem vencidos, dentre os eles destaca-se o projeto de dispositivos de radiofrequência e micro-ondas (como por exemplo antenas) que vão operar nessa nova rede. Assim, esse trabalho de conclusão de curso espera contribuir com os estudos e projetos de antenas aplicados a redes celulares 5G NR, principalmente com a característica de polarização dupla. Todavia, além de um projeto, tem como objetivo o desenvolvimento de uma metodologia de projeto que possibilite o reprojeto dessa estrutura de antena para os materiais (substratos dielétricos) e frequências de operação.

1.6 Considerações finais

Neste capítulo foram apresentadas as motivações que levaram a escolha do tema proposto, bem como os objetivos a serem alcançados com esse trabalho. Entende-se que esse capítulo é pontapé inicial para o Capítulo 2 (que apresenta o referencial teórico), para o Capítulo 3 (que apresenta os materiais e métodos), para o Capítulo 4 (que apresenta os resultados e discussões) e para o Capítulo 5 (que apresenta as conclusões e trabalhos futuros).

Capítulo 2

Referencial teórico

Neste capítulo são apresentados os conceitos teóricos principais para o desenvolvimento da microfita com dupla polarização para operação em redes celulares 5G NR na faixa de 3,5GHz.

2.1 Considerações iniciais

Este trabalho de conclusão de curso visa projetar uma antena de microfita com dupla polarização para operação em redes celulares 5G NR na faixa de 3,5GHz com ao menos 11,5dBi de ganho na direção de máxima irradiação. Para tal, pode-se dividir o projeto em duas partes:

- (A) Análise numérica da microfita com dupla polarização do artigo (19).
- (B) Reprojetado da antena do artigo (19) para operar na faixa de frequências no entorno de 3,5GHz. Após a validação numérica desse reprojetado é feita a aplicação de uma técnica para a modificação da operação para polarização dupla para que este comportamento ocorra no modelo operando em 3,5GHz.

Para que a segunda parte proposta seja executada, deve-se ter uma fundamentação teórica sobre antenas de microfita com dupla polarização operando no modo TM_{500} . Por isso, neste capítulo são apresentados os conceitos a respeito do assunto, tendo como sequência lógica a explicação teórica baseada na análise numérica da microfita com dupla polarização do artigo (19).

2.2 Antena de microfita com polarização dupla operando no modo TM_{500} com fendas no elemento ressonador

A antena apresentada em (19) é ilustrada na Figura 2.1. Basicamente, a estrutura é formada por dois condutores (o elemento ressonador em vermelho e o plano de terra em preto) e por um dielétrico (em cinza). Além disso, tem-se a alimentação feita via sonda coaxial (que pode ser um conector do tipo SMA). Os condutores geralmente são de cobre e possuem espessura muito fina (na casa de alguns micrômetros). O dielétrico possui uma espessura h (geralmente esses valores são pré-definidos pelos fabricantes), uma

permissividade dielétrica relativa ϵ_r e uma tangente de perdas $\tan(\delta)$ (valor esse ligado a condutividade de material que é pequena, porém não nula). É importante destacar que quanto maior for $\tan(\delta)$ maiores são as perdas no dielétrico (dissipação da energia por efeito Joule), levando a eficiência de irradiação menores, o que impacta no ganho da antena.

O modelo final da antena do artigo de referência (ver na Figura 2.1(c)) é dimensionado a partir de três etapas. Primeiramente, parte-se de uma antena de microfita retangular para operação no modo TM_{500} (ver na Figura 2.1(a)), em que as variáveis de projeto são a largura (W) e comprimento (L) do elemento ressonador, a largura (W_d) e o comprimento (L_d) do dielétrico e a distância da posição de alimentação (L_p). Na sequência são adicionadas duas fendas simétricas no ressonador (ver na Figura 2.1(b)), em que são acrescentadas as variáveis de projeto largura (W_s), comprimento (L_s) e distância entre as fendas (D_s). Por fim, conforme a Figura 2.1(c), para chegar ao modelo final é feito a sobreposição de duas antenas (ver Figura 2.1(b)) de modo ortogonal, onde P_1 e P_2 representam as posições em estão situadas as duas sondas coaxiais de alimentação.

Os modelos apresentados nas Figuras 2.1(a) e (b), devido a distribuição de campo que será melhor apresentada a seguir, apresenta polarização linear. Então, a sobreposição de duas antenas da Figura 2.1(b) de modo ortogonal gera (em duas excitações individuais) a possibilidade de operação em dupla polarização.

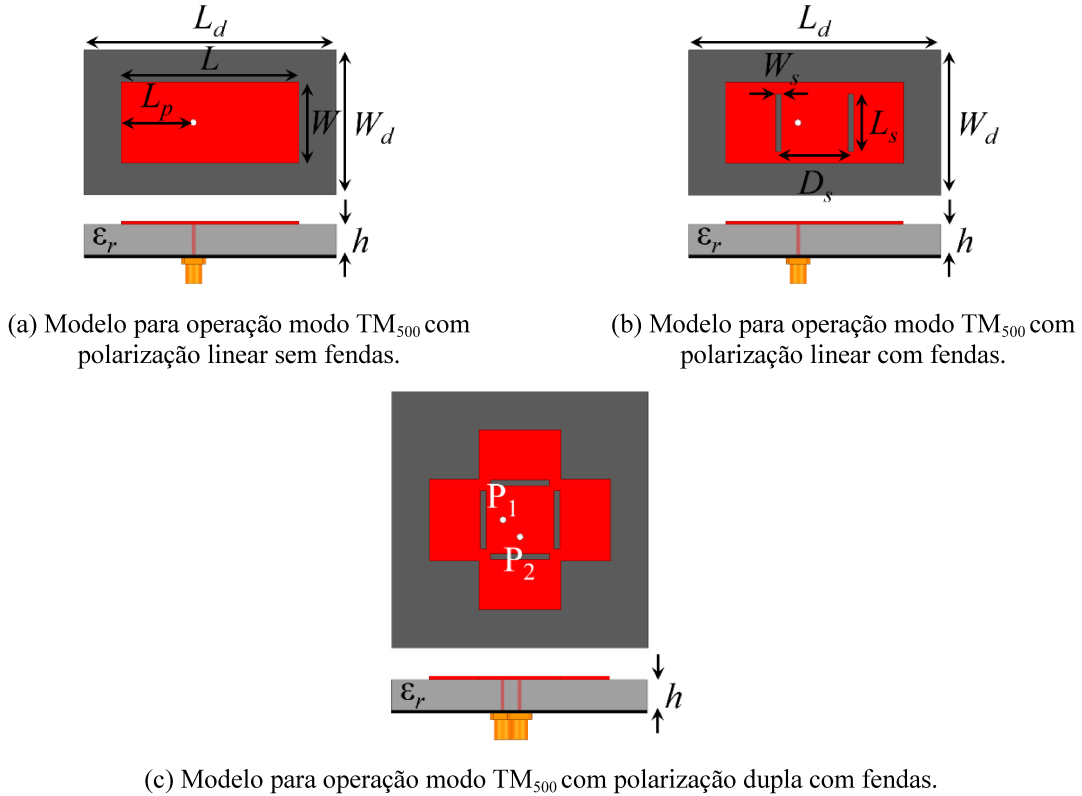
Os valores das variáveis da antena apresentados em (19) são apresentados na Tabela 2.1. Primeiramente observando os valores nota-se que antena em questão se difere do modelo clássico de antena de microfita retangulares apresentado em (14), visto que a largura do ressonador é menor que o seu comprimento, em que $W \cong 0,453L$. Isso ocorre, pois, o valor de L foi definido para que a antena operasse no modo TM_{500} e as equações que dimensionam o modelo clássico são para a operação no modo fundamental (TM_{100}).

Tabela 2.1 – Valores das variáveis da antena do artigo de referência.

Dados	Valores
Laminado dielétrico	F4B ($\epsilon_r = 2,55$ e $h = 2\text{mm}$)
L	58,50mm
W	26,50mm
L_d	83,00mm
W_d	47,70mm
L_p	5,50mm
W_s	1,90mm
L_s	19,00mm
D_s	23,90mm

Fonte: o Autor

Figura 2.1 – Ilustração do artigo de referência.



Fonte: o Autor

Como descrito algumas vezes anteriormente, as antenas de microfita operam em modos específicos. Assim, inicialmente é necessário definir o que vem a ser um modo de operação e particularizar para a antena em questão. Conforme apresentado em (14), uma forma simplista de analisar as antenas de microfita retangulares é fazendo uma aproximação da estrutura para uma cavidade ressonante retangular. Dessa forma, a estrutura suporta no substrato diferentes formatos de campo que são denominados modos de propagação. Os campos se propagando em uma cavidade podem ser do tipo transversal elétrico (TE) ou transversal magnético (TM), sendo no caso das antenas de microfita retangulares o TM o propagante. Os modos TE e TM possuem índices m, n, p (ou seja, TE_{mnp} e TM_{mnp}), em que esses índices representam o número de ciclos que os campos possuem, respectivamente, ao longo de L, W e h (no caso particular das antenas de microfita retangulares). Por exemplo, o modo TM_{500} quer dizer que os campos têm cinco ciclos ao longo de L e são constantes (não oscilam) ao longo de W e h .

Cada modo propagante em uma cavidade ressonante possui uma frequência de ressonância (frequência na qual os campos se estabilizam ou geram ondas estacionárias). Para as antenas de microfita retangulares, como os valores de h são bem inferiores a L e W

(condição típica para a faixa de micro-ondas), a frequência de ressonância desses modos (considerando a geometria apresentada na Figura 2.1(a)) pode ser aproximada para (20):

$$(f_r)_{mnp} \cong (f_r)_{mn} = \frac{3 \times 10^8}{2\sqrt{\epsilon_{ref}}} \sqrt{\left(\frac{m}{L+2\Delta L}\right)^2 + \left(\frac{n}{W+2\Delta W}\right)^2} \quad (2.1)$$

onde

$$\begin{aligned} \epsilon_{ref} &= \epsilon_{ref}(L) = \left(\frac{\epsilon_r + 1}{2}\right) + \left(\frac{\epsilon_r - 1}{2}\right) \frac{1}{\sqrt{1 + 12 \frac{h}{L}}}, & \text{Se } m = 0 \\ \epsilon_{ref} &= \epsilon_{ref}(W) = \left(\frac{\epsilon_r + 1}{2}\right) + \left(\frac{\epsilon_r - 1}{2}\right) \frac{1}{\sqrt{1 + 12 \frac{h}{W}}}, & \text{Se } n = 0 \\ \epsilon_{ref} &= \frac{\epsilon_{ref}(L) \epsilon_{ref}(W)}{\epsilon_r} & \text{Se } m \neq 0 \text{ e } n \neq 0 \end{aligned} \quad (2.2)$$

e

$$\begin{aligned} \Delta W &= \frac{0,412(\epsilon_{ref}(L) + 0,3) \left(0,264 + \frac{L}{h}\right)}{(\epsilon_{ref}(L) - 0,258) \left(0,8 + \frac{L}{h}\right)}, & (a) \\ \Delta L &= \frac{0,412(\epsilon_{ref}(W) + 0,3) \left(0,264 + \frac{W}{h}\right)}{(\epsilon_{ref}(W) - 0,258) \left(0,8 + \frac{W}{h}\right)} & (b) \end{aligned} \quad (2.3)$$

Das equações (2.1), (2.2) e (2.3) chega-se que para os modos TM_{100} e TM_{500} as frequências de ressonância ficam:

$$\begin{aligned} (f_r)_{100} &= \frac{3 \times 10^8}{2\sqrt{\epsilon_{ref}(W)}} \frac{1}{(L + 2\Delta L)} & (a) \\ (f_r)_{500} &= \frac{3 \times 10^8}{2\sqrt{\epsilon_{ref}(W)}} \frac{5}{(L + 2\Delta L)}. & (b) \end{aligned} \quad (2.4)$$

Conforme apresentado em (14), tipicamente define-se o valor de L com base na frequência desejada para o modo fundamental, de acordo com a equação (2.4(a)). Com isso, define-se a frequência do TM_{500} como sendo cinco vezes maior que a do TM_{100} . Todavia, é importante destacar que essas expressões são aproximadas, podendo ter leves variações nessa relação.

Aplicando equações (2.1), (2.2) e (2.3) para os valores apresentados na Tabela 2.1 chega-se em $(f_r)_{100} \cong 1,62\text{GHz}$. Assim, de acordo com a equação (2.4(b)) tem-se $(f_r)_{500} \cong 8,1\text{GHz}$. Todavia, realizando uma análise numérica pelo método dos elementos finitos no simulador comercial Ansys Electronics Desktop (ver na Figura 2.2(a)), observa-se que a frequência de ressonância do modo T_{500} ocorre em $(f_r)_{500} \cong 7,8\text{GHz}$, o que leva um erro de aproximadamente 3,7%, dentro do previsto em (20). Assim, confirma-se que equações (2.1), (2.2) e (2.3) são aproximadas (com certo erro), porém, servem como um norte importante nas análises.

É importante destacar que na Figura 2.2(a) identifica-se o modo propagante pelo número de nulos do campo elétrico no substrato. Nota-se que ao longo de L tem-se cinco pontos de nulo e ao longo de W não nulos. Desse modo, pode-se afirmar que na frequência de 7,8GHz tem-se o modo TM_{500} operando.

Figura 2.2 – Análise da distribuição de modos no substrato dielétrico.



(a) Modelo para operação modo TM_{500} com polarização linear sem fendas para $f = 7,8\text{GHz}$.

(b) Modelo para operação modo TM_{500} com polarização linear com fendas para $f = 5,9\text{GHz}$.

Fonte: o Autor

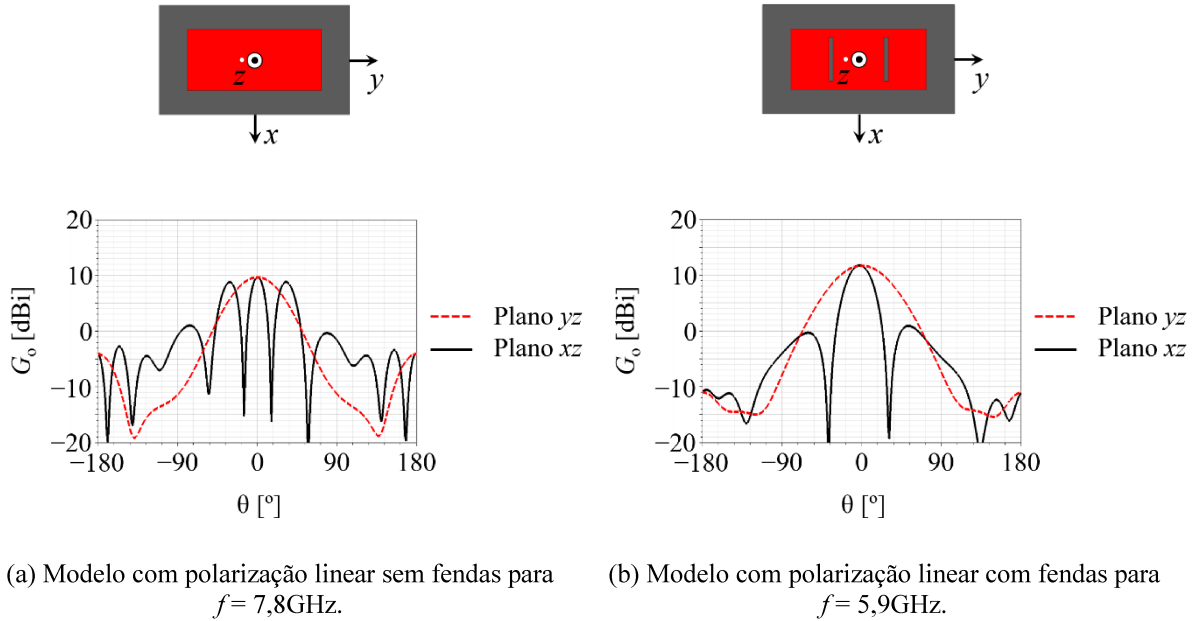
De modo simplificado, uma antena de microfita retangular pode ser representada também como uma rede de duas fendas irradiantes separadas por um comprimento L (14). Para o modo TM_{100} tem-se duas fendas irradiantes separadas de meio comprimento de onda (conforme manipulação da equação 2.4(a)). Desse modo, observa-se uma soma construtiva dos campos, o que leva a um diagrama de irradiação com apenas um lóbulo principal (lóbulos laterais praticamente nulos) com diretividade na direção de máxima irradiação (nesse caso $+z$) na ordem de 7dB. Para o modo TM_{500} tem-se duas fendas irradiantes separadas de cinco sobre dois comprimentos de onda guiados (conforme manipulação da equação 2.4(b)). Dessa forma, tem-se a densidade de corrente superficial com cinco ciclos de variação, três em fase e dois

em contra fase. Com isso, o diagrama de irradiação no plano yz apresenta um lóbulo principal, com diretividade na direção de máxima irradiação (neste caso $+z$) na ordem de 10dB, e quatros lóbulos laterais (ou lóbulos secundários) com alta intensidade (ver na Figura 2.3(a)).

A existência de lóbulos secundários com alta intensidade como na irradiação de uma antena de microfita é algo que pode trazer problemas ao funcionamento da antena. Primeiramente, os lóbulos secundários “reduzem” irradiação no lóbulo principal, ou seja, a energia que poderia estar indo para a direção que realmente quer se irradiar está indo para outras direções. Isso implica na redução do ganho da antena (que geralmente é quantificado na direção de máxima irradiação). Outro problema é a irradiação por lóbulos laterais que cria réplicas do sinal transmitido, podendo originar sinais de múltiplos percursos. Isso pode gerar problemas de desvanecimento no canal rádio móvel.

Tendo em vista reduzir os lóbulos laterais e, conseqüentemente, aumentar o ganho, o trabalho apresentado em (19) propõe a inserção de duas fendas simétricas ao elemento irradiador (ver na Figura 2.1(b)). As duas fendas devem ser inseridas nos pontos de transição (ou seja, nulos) de campo elétrico sob o ressonador. Os campos elétricos irradiados pelas duas fendas são polarizados em fase com a irradiação proveniente das aberturas irradiantes situadas nas extremidades do ressonador. Assim, a superposição de campos irradiados pelas duas fendas inseridas (que estão operando no modo TM_{100}) com a irradiação das aberturas irradiantes situadas nas extremidades do ressonador que estão operando no modo TM_{500} resulta na redução dos lóbulos laterais e, conseqüentemente, no aumento do ganho na direção de máxima irradiação. Isso é evidenciado no diagrama de irradiação apresentado na Figura 2.3(b), em que o ganho na direção de máxima irradiação (neste caso $+z$) aumentou para cerca de 11,7dBi e os lóbulos laterais estão praticamente inferiores a 0dBi.

Figura 2.3 – Diagramas de irradiação da antena de microfita operando no modo TM_{500} .



Fonte: o Autor

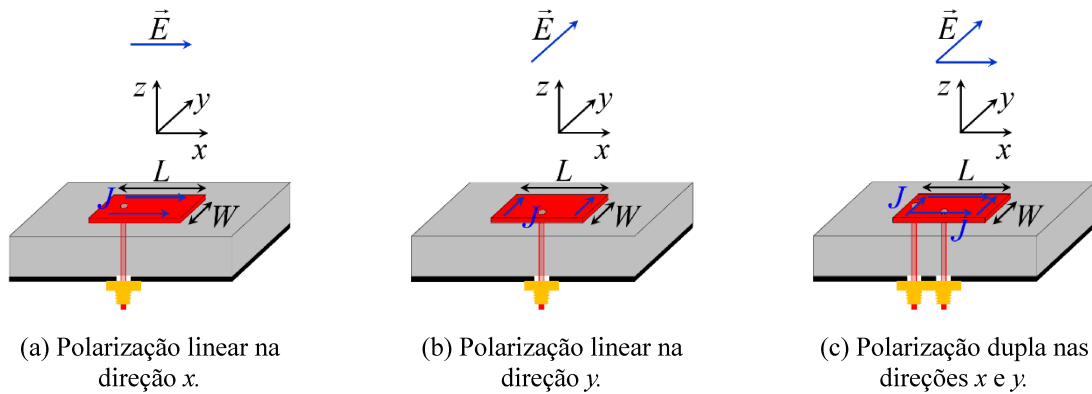
A técnica apresentada em (19) demonstra-se muito eficiente para redução de lóbulos laterais e maximização de ganho para as antenas de microfita operando no modo TM_{500} . Entretanto, é importante salientar que a inserção das fendas provoca um deslocamento na frequência de ressonância do modo TM_{500} . Tal conceito é explicado com maiores detalhes em (21). Para a antena do artigo referência principal, conforme a Figura 2.2, o modo TM_{500} sem a presença das fendas (cujas frequência de ressonância era 7,8GHz) é deslocado para 5,9GHz (veja que na Figura 2.2(b) em 5,9GHz tem-se os cinco pontos de nulo que caracterizam o modo TM_{500}).

As antenas de microfita retangulares, para formas de alimentação convencionais, por exemplo via sonda coaxial, irradiam ondas com polarização linear (14). Todavia, uma importante características dessas antenas é a possibilidade de mudança de polarização apenas modificando o ponto da alimentação. Com isso, pode-se obter operação em polarização dupla, circulares e elípticas.

Uma maneira muito eficiente de obter uma antena de microfita com polarização dupla dá-se pela utilização de um ressonador quadrado (caso particular com retangular) com duas alimentação ortogonais entre si conforme descrito em (22). Isso ocorre, pois, a polarização da antena depende diretamente da forma com que a antena é alimentada. Cada alimentação (no caso de se ter duas) produz uma distribuição de corrente no ressonador que levará a orientação do campo elétrico irradiado em uma polarização específica. Conforme apresentado na Figura 2.4(a), quando a alimentação é realizada via sonda coaxial em uma linha ao longo de L e

central à W a densidade superficial de corrente (J) se desloca na direção x , levando assim a polarização do campo elétrico irradiado será linear na direção x . De acordo com a Figura 2.8(b), se a alimentação for feita em uma linha ao longo de W e central à L a J se desloca na direção y , de forma que a polarização do campo elétrico irradiado será linear na direção y . Então, de acordo com a Figura 2.8(c), se a alimentação for feita por duas sondas coaxiais (uma em uma linha ao longo de L e central à W e outra em uma linha ao longo de W e central à L) a densidade superficial de corrente terá duas componentes, uma em x e outra em y , e a polarização do campo elétrico irradiado será dupla nas direções x e y . Entretanto, é importante destacar que para a polarização dupla ter mesma intensidade é necessário a excitação de dois modos degenerados (com mesma frequência de ressonância). Para isso deve-se ter $W = L$, ou seja, quando a antena possui o elemento ressonador quadrado.

Figura 2.4 – Ilustração da polarização das antenas de microfita retangulares em função da alimentação.



Fonte: o Autor

O trabalho apresentado no artigo de referência principal (19) parte dos conceitos necessários para se obter polarização dupla a partir da alimentação por duas sondas coaxiais dispostas de modo ortogonal. Entretanto, conforme a Figura 2.1(c), para tal, é feito a sobreposição de forma ortogonal de duas das antenas apresentadas na Figura 2.1(b). Dessa forma, tem-se a excitação de duas polarizações (uma por cada sonda coaxial) operando no modo TM_{500} com baixos lóbulos laterais e aumento de ganho na direção de máxima irradiação.

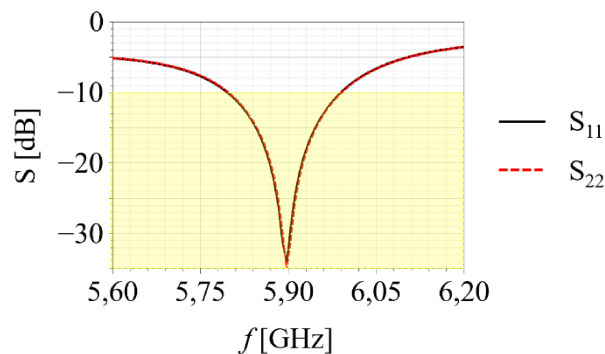
Para avaliar a eficácia da técnica apresentada em (19), analisou-se numericamente pelo método dos elementos finitos no simulador comercial Ansys Electronics Desktop o modelo da Figura 2.1(c). Para tal, importante destacar que foi definida a excitação por duas sondas coaxiais, definidas como porta 1 (disposta sobre uma linha ao longo do eixo y) e porta 2 (disposta sobre uma linha ao longo do eixo x).

A primeira métrica analisada foi o coeficiente de reflexão (S_{nn} , onde n a porta sobre análise, sendo nesse caso $n = 1$ ou $n = 2$) com o objetivo de quantificar a banda de operação da antena. A partir do S_{nn} pode-se quantificar o grau de casamento de impedância de um dispositivo (por exemplo uma antena), definindo assim a faixa em que ela pode operar em relação a esse critério. O S_{nn} pode ser calculado em escala logarítmica como (14):

$$S_{nn} [\text{dB}] = 20 \log \left(\left| \frac{Z_{en} - Z_0}{Z_{en} + Z_0} \right| \right), \quad (4.1)$$

onde Z_{en} é a impedância de entrada do dispositivo (nesse caso da antena) e Z_0 é a impedância característica utilizada na medição (tipicamente tem-se $Z_0 = 50\Omega$ como um valor definido para os sistemas de telecomunicações, valor esse adotado no trabalho). Na prática geralmente considera-se a banda de uma antena ($B_W = f_{\text{máx}} - f_{\text{mín}}$) para a faixa de frequências em $S_{nn} \leq -10\text{dB}$ (em escala linear $S_{nn} = 0,1$ para a relação entre potência incidente e refletida e $S_{nn} \cong 0,316$ para a relação entre tensão incidente e refletida). Desse modo, garante-se que ao menos 90% da potência disponível pelo gerador (ou circuito conectado aos terminais) é entregue à antena, podendo então ser convertida em onda eletromagnética. Então, da Figura 2.5, nota-se que o modelo apresentado em (19) opera de 5,8GHz à 6,0GHz, o que leva à uma banda percentual de aproximadamente 3,4% da frequência central de operação, que nesse caso é 5,9GHz. Tal comportamento demonstra plena conformidade com o apresentado no artigo de referência.

Figura 2.5 – Coeficiente de reflexão em função da frequência da antena do artigo de referência principal.

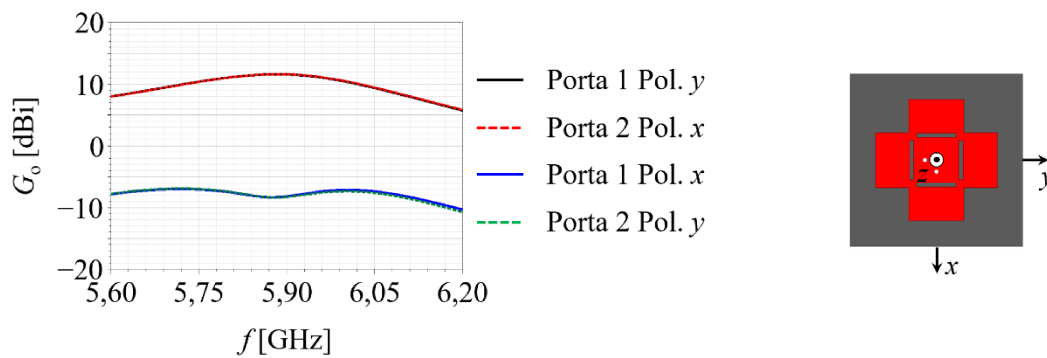


Fonte: o Autor

Uma segunda métrica importante a ser analisada é o ganho na direção de máxima irradiação em função da frequência. A direção de máxima irradiação ocorre em $+z$, por isso, definiu-se os ângulos em coordenadas esféricas para análise $\theta = 0^\circ$ e $\phi = 0^\circ$ (também poderia

ser $\varphi = 90^\circ$ que levaria ao mesmo valor). Nota-se na Figura 2.6 que o ganho pode ter valor expressivo ou não em uma certa polarização dependendo da porta que é excitada. Se for a porta 1 tem-se ganho apenas na polarização y e se for a porta 2 tem-se ganho apenas na polarização x . Nota-se que para $f = 5,9\text{GHz}$ (frequência de melhor casamento de impedâncias) o ganho na direção de máxima irradiação é $11,55\text{dBi}$ na polarização x (para a porta 2) e na polarização y (para a porta 1). Tal comportamento demonstra plena conformidade com o descrito no artigo de referência.

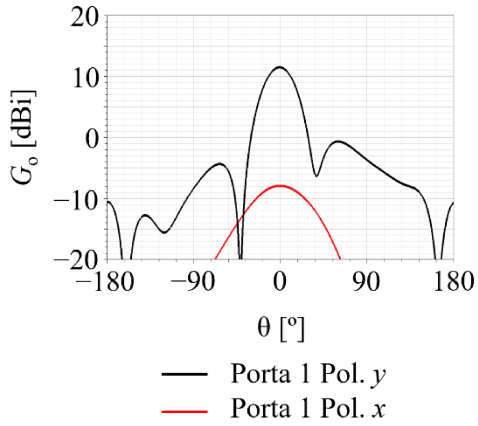
Figura 2.6 – Ganho na direção de máxima irradiação em função da frequência da antenna do artigo de referência principal.



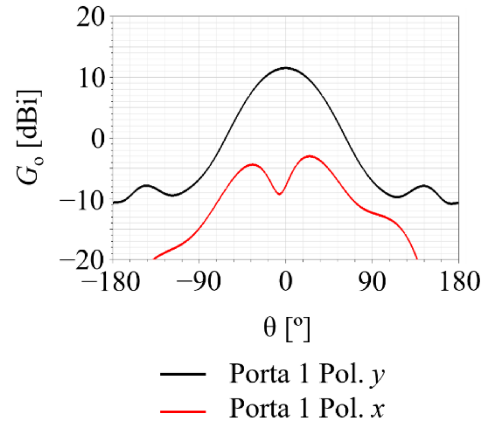
Fonte: o Autor

Uma terceira métrica importante a ser analisada são os diagramas de irradiação em planos específicos de análise (nesse caso nos planos xz e yz). Com os diagramas de irradiação, além do ganho na direção de máxima irradiação, consegue-se analisar também o nível de lóbulos laterais. As análises foram realizadas para $f = 5,9\text{GHz}$ (frequência de melhor casamento de impedâncias) e os resultados são apresentados na Figura 2.7. Observa-se primeiramente que o formato da irradiação se altera em um mesmo plano ao mudar a porta de alimentação (o que se tem no xz para a porta 1 se tem no yz para a porta 2 e vice versa). Destaca-se também que a antena apresenta ganho na direção de máxima irradiação (nesse caso $+z$) de aproximadamente $11,55\text{dBi}$. Outro fato importante é o nível de lóbulos laterais que se mantém cerca $12,15\text{dB}$ abaixo que o valor da máxima irradiação. Tais comportamentos demonstram plena conformidade com o apresentado no artigo de referência.

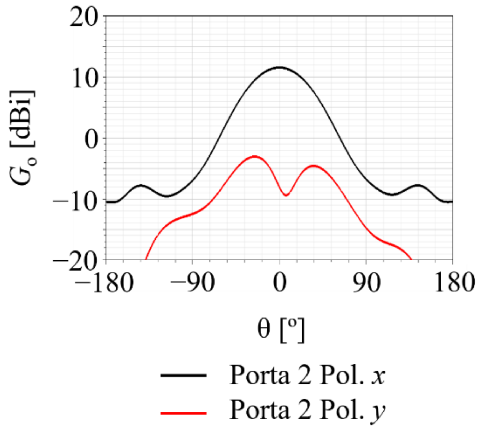
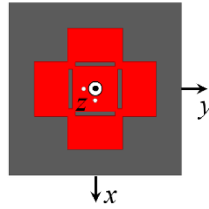
Figura 2.7 – Diagramas de irradiação da antena do artigo de referência principal.



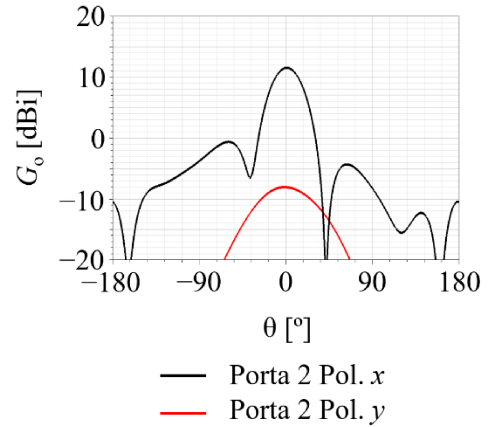
(a) Plano yz em 5,9GHz para a porta 1 excitada.



(b) Plano xz em 5,9GHz para a porta 1 excitada.



(c) Plano yz em 5,9GHz para a porta 2 excitada.



(d) Plano xz em 5,9GHz para a porta 2 excitada.

Fonte: o Autor

2.3 Considerações finais

Neste capítulo foram apresentados os conceitos teóricos e as características de projeto da antena do artigo de referência principal desse trabalho. Tais conceitos são fundamentais para o desenvolvimento descrito no Capítulo 4, a partir da metodologia apresentada no Capítulo 3. Assim, acredita-se que o estudo já realizado nesse capítulo traz importantes informações ao trabalho.

Capítulo 3

Materiais e métodos

Neste capítulo são apresentados a metodologia de desenvolvimento e os recursos necessários deste trabalho de conclusão de curso.

3.1 Considerações iniciais

O objetivo desse trabalho é o projeto numérico de uma antena de microfita de alto ganho (com valor na direção de máxima irradiação de ao menos 11,55dBi para estar em conformidade com o artigo de referência principal) e polarização dupla para aplicações em redes celulares 5G NR na faixa de 3,5GHz. Dessa forma, segue-se uma metodologia voltada ao estudo teórico (em livros e artigos, já executada até o presente momento) e simulações eletromagnéticas a partir do método dos elementos finitos do programa comercial Ansys Electronics Desktop (análises que já se iniciaram no Capítulo 2 e terão continuidade no Capítulo 4).

3.2 Metodologia de desenvolvimento

Para validar se o projeto apresenta as características esperadas realizou-se um conjunto de simulações numéricas. Para tal, teve-se como métricas de desempenho o casamento de impedâncias (dado pelo estudo do coeficiente de reflexão) e a irradiação (dada pelo estudo da do ganho em função da frequência e de diagramas de irradiação).

A metodologia de desenvolvimento do projeto pode ser subdividida em duas partes:

- i) Recalcular as dimensões da antena para $f = 3,5\text{GHz}$ e simular a nova geometria.
- ii) Otimizar (ajustar) as dimensões da antena para que as métricas de desempenho sejam atendidas.

3.3 Recursos necessários

O projeto da antena de microfita de alto ganho e polarização dupla proposta nesse trabalho foi executado em ambiente de simulação numérica no programa Ansys Electronics Desktop, empregando o método dos elementos finitos no módulo de simulação HFSS (*High Frequency Structure Simulator*). Atualmente, o curso de Eletrônica e de Telecomunicações do

campus de Patos de Minas não possui a licença do *software*, por isso, as simulações serão realizadas com auxílio de uma parceria com o professor Rafael Abrantes Penchel do Departamento de Engenharia Eletrônica e de Telecomunicações da Universidade Estadual Paulista (Unesp). Assim, as simulações serão realizadas por meio de acesso remoto via plataforma AnyDesk.

3.4 Considerações finais

Neste capítulo descreveu-se de forma simples e objetiva a metodologia e os recursos necessários para o desenvolvimento deste trabalho. Com base nessas informações tem-se as informações sobre como o desenvolvimento demonstrado no Capítulo 4 é realizado.

Capítulo 4

Resultados e discussões

Neste capítulo são apresentados os estudos e resultados numéricos da antena proposta nesse trabalho. Assim, acredita-se ter as informações mais relevantes a respeito de todo o desenvolvimento

4.1 Considerações iniciais

A partir do referencial teórico apresentado no Capítulo 2 e da metodologia de desenvolvimento e recursos descritos no Capítulo 3, tem-se a bagagem para o projeto numérico da antena de microfita de alto ganho e polarização dupla para operação na faixa de frequências de 3,5GHz do 5G NR. Assim, os estudos que são apresentados nesse capítulo seguem a divisão: análise da antena apenas com as dimensões recalculadas para a faixa de 3,5GHz e análise da antena apenas com as dimensões otimizadas para atender as métricas de projeto.

4.2 Antena apenas com as dimensões recalculadas para a faixa de 3,5GHz

Tendo validado os resultados do artigo de referência principal em (19) no Capítulo 2, o passo seguinte foi reprojetar a geometria dessa antena para a faixa de frequência de 3,5GHz. Para tal, definiu-se uma parametrização para as variáveis de projeto em função de L (que como descrito no Capítulo 2 é a variável que controla diretamente a frequência de ressonância do modo TM_{500}), de modo a manter a proporcionalidade da geometria, com base nos valores originais do artigo, chegando à $W = 0,453L$, $L_d = W_d \cong 1,419L$, $L_p \cong 0,094L$, $W_s \cong 0,032L$, $L_s = 0,325L$ e $D_s = 0,409L$. Outro fato importante no reprojeto é a escolha correta dos laminados dielétricos. Conforme já descrito no Capítulo 1, o substrato F4B possui $\tan(\delta) = 0,001$, sendo definido para esse projeto o substrato RT/duroid® 5880 com $\tan(\delta) = 0,0009$ com o objetivo de melhorar o ganho.

Para o reprojeto, definiu-se a estratégia de dimensionamento em relação ao modo fundamental TM_{100} , cujas equações de projeto são bem difundidas em (14). Então, primeiramente identificou-se a razão de proporção entre a frequência de operação da antena modificada (com como todos os detalhes apresentados no artigo de referência principal) operando no modo TM_{500} com a frequência de ressonância que as dimensões (principalmente

L , W e h) levam ao modo TM_{100} . Assim, para a antena do artigo de referência principal com $\epsilon_r = 2,55$, $h = 2\text{mm}$, $L \cong 58,5\text{mm}$ e $W \cong 26,5\text{mm}$, chega-se à $(f_r)_{100} \cong 1,62\text{GHz}$. Como a frequência de operação da antena modificada no modo TM_{500} é $(f_r)_{500} \cong 5,9\text{GHz}$, tem-se a razão de proporcionalidade de aproximadamente 3,65, ou seja, $(f_r)_{500} \cong 3,65(f_r)_{100}$. Assim, deve-se realizar o cálculo de L para $(f_r)_{100} \cong 0,96\text{GHz}$ para se obter a operação no modo TM_{500} modificado em 3,5GHz. Dessa forma, o substrato RT/duroid® 5880 com $h = 1,75\text{mm}$, equacionando, chegou-se à $L \cong 105,81\text{mm}$ para antena operar em 3,5GHz. Então, aplicando a parametrização apresentada anteriormente, chegou-se aos valores de todas as variáveis do projeto, como reportado na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Valores das variáveis da antena apenas com as dimensões recalculadas para a faixa de 3,5GHz.

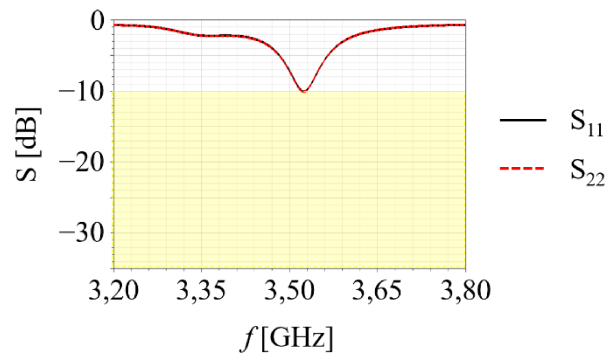
Dados	Valores
Laminado dielétrico	RT/duroid® 5880 ($\epsilon_r = 2,2$ e $h = 1,52\text{mm}$)
L	105,81mm
W	47,93mm
L_d	150,14mm
W_d	150,14mm
L_p	9,94mm
W_s	3,38mm
L_s	34,38mm
D_s	43,27mm

Fonte: o Autor

Com as variáveis recalculadas para 3,5GHz, analisou-se numericamente a geometria no simulador Ansys Electronics Desktop, empregando o método dos elementos finitos no módulo de simulação HFSS. Então, para atestar a validade do projeto, quantificou-se o coeficiente de reflexão, o ganho e função da frequência e os diagramas de irradiação.

Primeiramente, analisando S_{nn} (ver na Figura 4.1), nota-se que a operação da antena se deslocou para a próximo de 3,5GHz. Entretanto, não há valores de frequência em $S_{nn} \leq -10\text{dB}$, não caracterizando banda de operação da antena. Isso ocorre, pois, principalmente pela mudança do substrato, além de alterar a frequência de ressonância, modificou-se consideravelmente a impedância de entrada da antena. Desse modo, é necessário ajustar o ponto de alimentação (local onde as sondas coaxiais são inseridas) para corrigir o problema.

Figura 4.1 – Coeficiente de reflexão em função da frequência da antenna apenas com as dimensões recalculadas para a faixa de 3,5GHz.

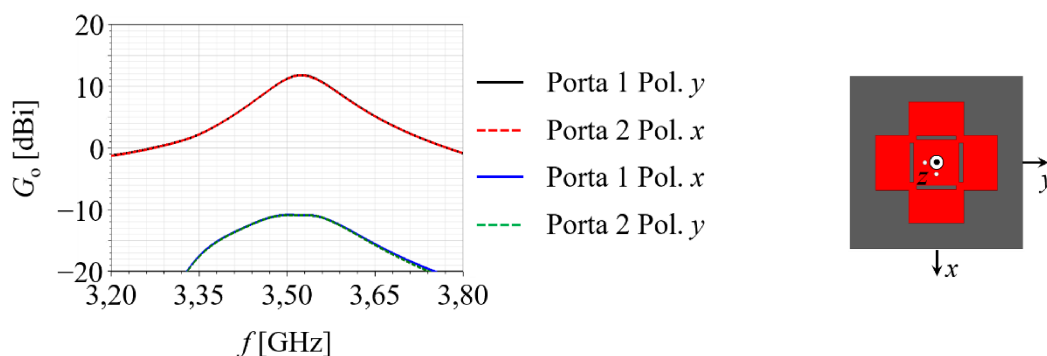


Fonte: o Autor

Mesmo que a antenna ainda não esteja corretamente operando em termos de S_{mn} , analisou-se o comportamento da irradiação com o objetivo de avaliar se o reprojeto mantém as características de polarização dupla, alto ganho na direção de máxima irradiação e baixos lóbulos laterais.

Na Figura 4.2 tem-se o comportamento do ganho na direção de máxima irradiação (na direção $+z$, com $\theta = 0^\circ$ e $\phi = 0^\circ$) em função da frequência da antenna com as variáveis recalculadas. Nota-se novamente que o ganho pode ter valor expressivo ou não em uma certa polarização dependendo da porta que é excitada. Se for a porta 1 tem-se ganho apenas na polarização y e se for a porta 2 tem-se ganho apenas na polarização x . Nota-se que para $f = 3,5\text{GHz}$ (frequência de reprojeto) o ganho na direção de máxima irradiação é 11,8dBi na polarização x (para a porta 2) e na polarização y (para a porta 1). Tal comportamento demonstra a validade da operação em polarização dupla e que a mudança do substrato (mesmo que ainda sem casamento de impedâncias) já proporcionou o aumento no ganho.

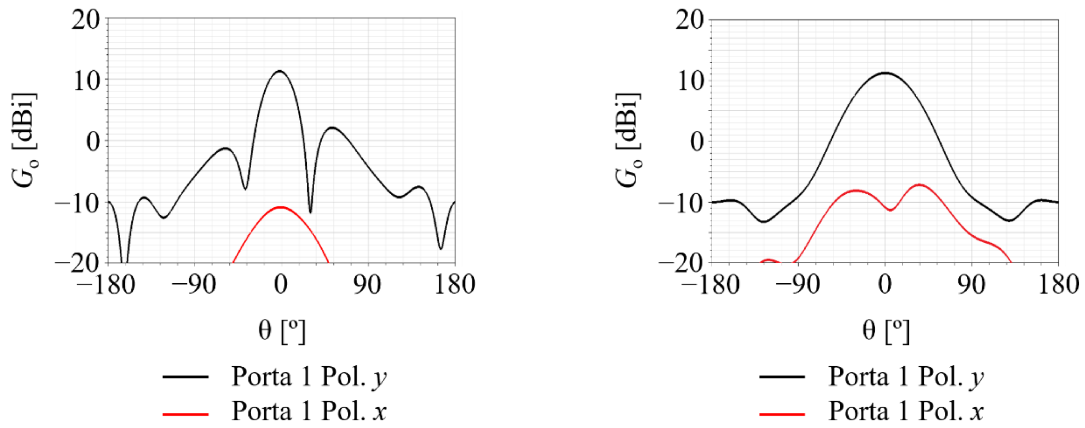
Figura 4.2 – Ganho na direção de máxima irradiação em função da frequência da antenna apenas com as dimensões recalculadas para a faixa de 3,5GHz.



Fonte: o Autor

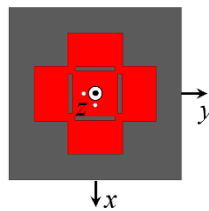
Na Figura 4.3 tem-se os diagramas de irradiação em planos específicos de análise (nesse caso nos planos xz e yz) da antena com as variáveis recalculadas. As análises foram realizadas para $f = 3,5\text{GHz}$ (frequência de reprojeto). Observa-se primeiramente que o formato da irradiação se altera em um mesmo plano ao mudar a porta de alimentação (o que se tem no xz para a porta 1 se tem no yz para a porta 2 e vice versa) como já previsto na análise do artigo de referência principal. Destaca-se também que a antena apresenta ganho na direção de máxima irradiação (nesse caso $+z$) de aproximadamente 11,8dBi e que os lóbulos laterais que se mantêm cerca 10dB abaixo que o valor da máxima irradiação. Tal comportamento demonstra que o reprojeto é eficiente para se obter alto ganho e baixos lóbulos laterais.

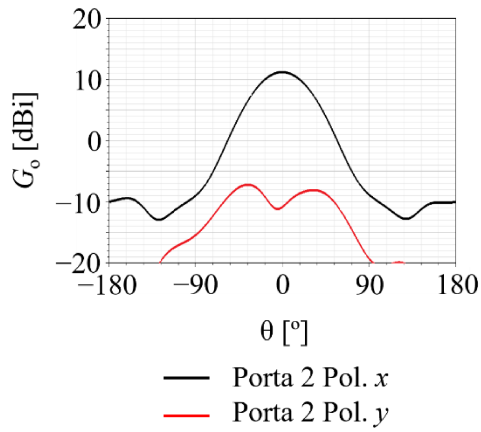
Figura 4.3 – Diagramas de irradiação da antena apenas com as dimensões recalculadas para a faixa de 3,5GHz.



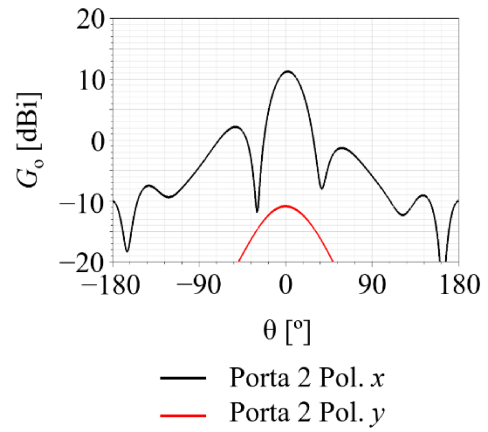
(a) Plano yz em 3,5GHz para a porta 1 excitada.

(b) Plano xz em 3,5GHz para a porta 1 excitada.





(c) Plano yz em 3,5GHz para a porta 2 excitada.



(d) Plano xz em 3,5GHz para a porta 2 excitada.

Fonte: o Autor

4.3 Antena apenas com as dimensões otimizadas para atender as métricas de projeto

Tendo constatado a inexistência de banda em função do S_{11} para o projeto, fez-se necessário modificar as variáveis da antena (ou ao menos uma até esse ponto). Como já mencionado, o problema está ligado aos valores da impedância de entrada da antena. Entretanto, sabe-se que a impedância de entrada na antena de microfita retangular é proporcional ao quadrado do campo elétrico no substrato dielétrico em uma posição qualquer do ressonador (14). Além disso, conforme observado na Figura 2.2, o campo elétrico para o modo TM_{500} varia (com valores de máximos e mínimos), podendo assim encontrar um ponto (posição de inserção das sondas coaxiais) que leve a casamento de impedâncias. Então, a partir de análises no simulador Ansys Electronics Desktop, empregando o método dos elementos finitos no módulo de simulação HFSS, chegou-se à posição de inserção das alimentações como sendo $L_p \cong 0,15L \cong 15,87\text{mm}$. É importante destacar que todas as demais variáveis se mantiveram com os valores apresentados na Tabela 4.1.

Conforme a Figura 4.4, a estratégia de modificação de L_p surtiu efeito, de modo que a antena passou a apresentar casamento de impedâncias. Entretanto, o resultado demonstra que a antena opera de 3,49GHz à 3,55GHz (com uma banda percentual de aproximadamente 1,7% da frequência central de operação, que nesse caso é 3,52GHz), o que demonstra que a operação está levemente deslocada para frequências superiores do que se deseja. Tal comportamento demonstra plena conformidade com o apresentado no artigo de referência. Desse modo, é necessário aumentar o valor de L (de modo sutil) para corrigir o problema.

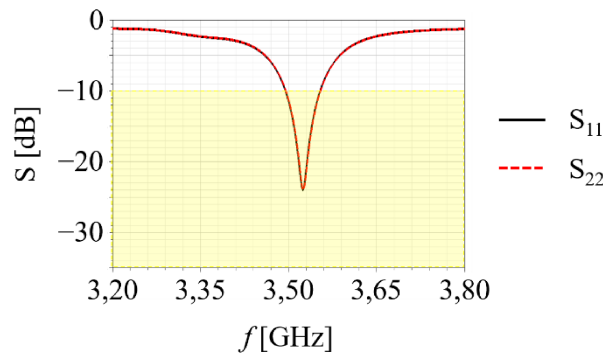
A partir de análises no simulador Ansys Electronics Desktop, empregando o método dos elementos finitos no módulo de simulação HFSS, chegou-se ao valor de $L \cong 106,26\text{mm}$ para que a operação ocorra de modo mais centrada em 3,5GHz (como apresentado na Figura 4.5). Entretanto, como todas as variáveis das antenas estão parametrizadas a L ($W = 0,453L$, $L_d = W_d \cong 1,419L$, $L_p \cong 0,15L$, $W_s \cong 0,032L$, $L_s = 0,325L$ e $D_s = 0,409L$), tal mudança alterou todos os valores, que assumem os apresentados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Valores das variáveis da antenna apenas com as dimensões otimizadas para atender as métricas de projeto.

Dados	Valores
Laminado dielétrico	RT/duroid® 5880 ($\epsilon_r = 2,2$ e $h = 1,52\text{mm}$)
L	106,26mm
W	48,14mm
L_d	150,78mm
W_d	150,78mm
L_p	15,94mm
W_s	3,40mm
L_s	34,53mm
D_s	43,46mm

Fonte: o Autor

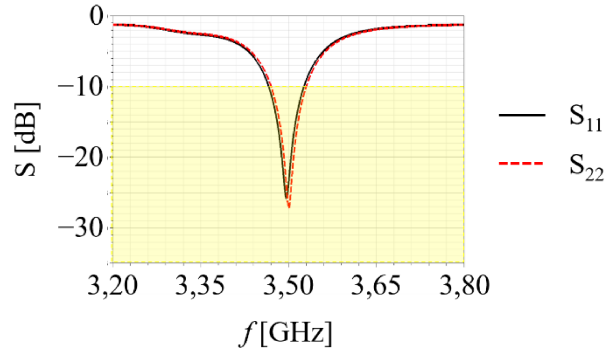
Figura 4.4 – Coeficiente de reflexão em função da frequência da antenna com a posição da alimentação ajustada.



Fonte: o Autor

Conforme a Figura 4.5, a estratégia de modificação de L surtiu efeito, de modo que o resultado demonstra que a antenna opera de 3,47GHz à 3,53GHz (com uma banda percentual de aproximadamente 1,71% da frequência central de operação, que nesse caso é 3,5GHz). Assim, valida-se em termos de banda de operação o projeto proposto nesse trabalho.

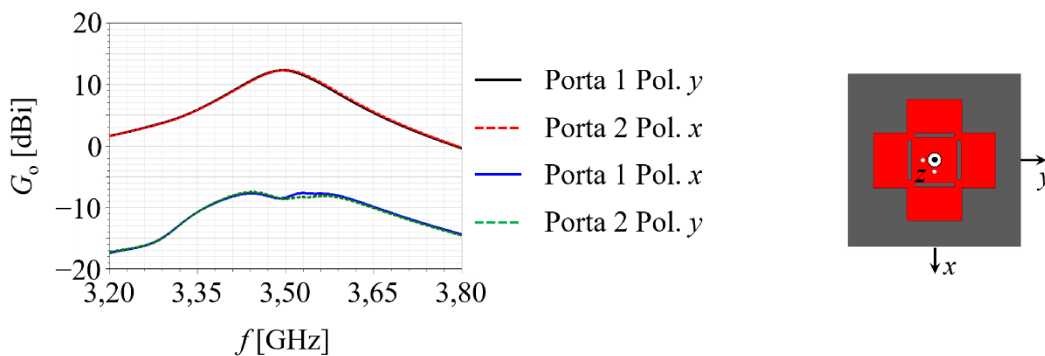
Figura 4.5 – Coeficiente de reflexão em função da frequência da antenna com a posição da alimentação e o comprimento do ressonador ajustados.



Fonte: o Autor

Na Figura 4.6 tem-se o comportamento do ganho na direção de máxima irradiação (na direção $+z$, com $\theta = 0^\circ$ e $\phi = 0^\circ$) em função da frequência para antenna com os valores finais das variáveis de projeto. Nota-se novamente que o ganho pode ter valor expressivo ou não em uma certa polarização dependendo da porta que é excitada. Se for a porta 1 tem-se ganho apenas na polarização y e se for a porta 2 tem-se ganho apenas na polarização x . Nota-se que para $f = 3,5\text{GHz}$ (frequência de reprojeção) o ganho na direção de máxima irradiação é 12,3dBi na polarização x (para a porta 2) e na polarização y (para a porta 1). Tal comportamento demonstra a validade da operação em polarização dupla e que a mudança do substrato garantiu um aumento no ganho de cerca de 0,74dB em relação a antenna do artigo de referência. Assim, valida-se em termos de ganho em função da frequência o projeto proposto nesse trabalho.

Figura 4.6 – Ganho na direção de máxima irradiação em função da frequência da antenna com a posição da alimentação e o comprimento do ressonador ajustados.

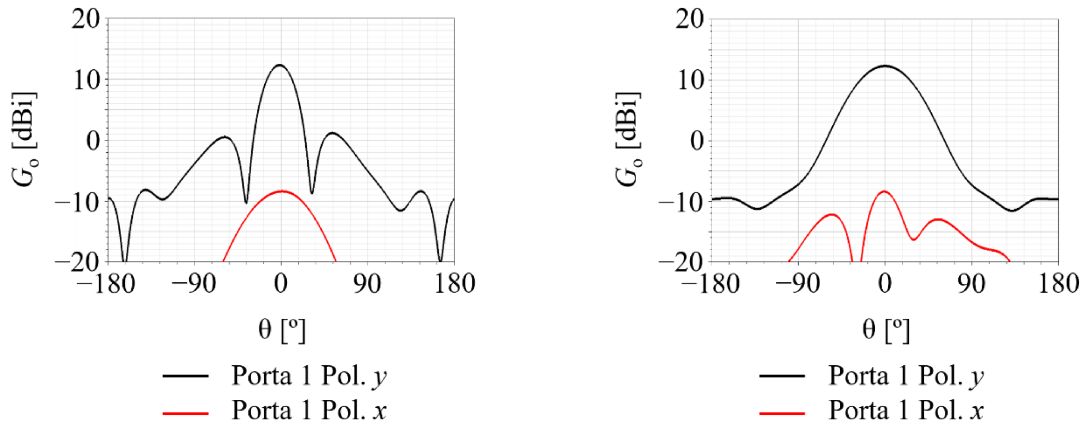


Fonte: o Autor

Na Figura 4.7 tem-se os diagramas de irradiação em planos específicos de análise (nesse caso nos planos xz e yz) da antenna com os valores finais das variáveis de projeto. As análises foram realizadas para $f = 3,5\text{GHz}$ (frequência de reprojeção). Observa-se

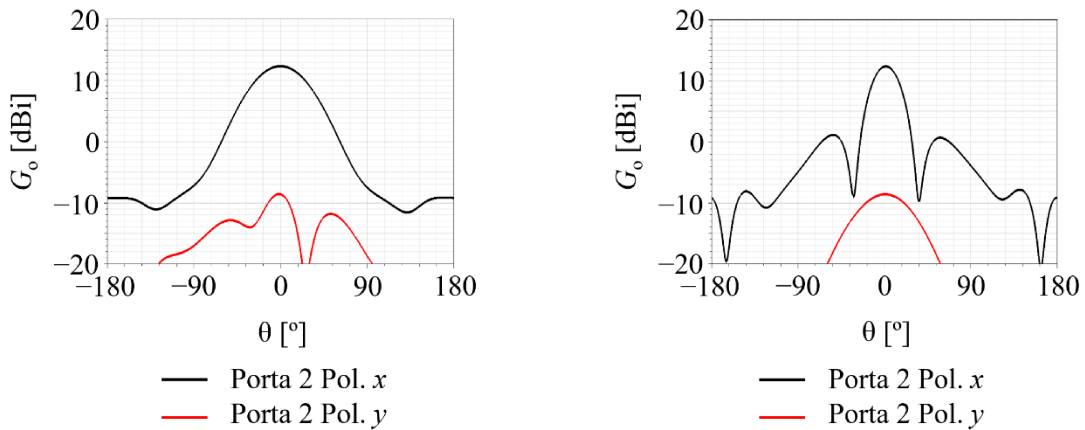
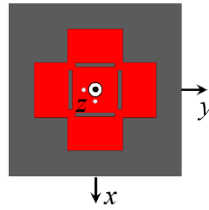
primeiramente que o formato da irradiação se altera em um mesmo plano ao mudar a porta de alimentação (o que se tem no xz para a porta 1 se tem no yz para a porta 2 e vice versa) como já previsto nas análises anteriores. Destaca-se também que a antena apresenta ganho na direção de máxima irradiação (nesse caso $+z$) de aproximadamente 12,3dBi e que os lóbulos laterais que se mantêm cerca 11,2dB abaixo que o valor da máxima irradiação. Assim, valida-se em termos de diagramas de irradiação o projeto proposto nesse trabalho.

Figura 4.7 – Diagramas de irradiação da antena com a posição da alimentação e o comprimento do ressonador ajustados.



(a) Plano yz em 3,5GHz para a porta 1 excitada.

(b) Plano xz em 3,5GHz para a porta 1 excitada.



(c) Plano yz em 3,5GHz para a porta 2 excitada.

(d) Plano xz em 3,5GHz para a porta 2 excitada.

Fonte: o Autor

4.4 Considerações finais

Neste capítulo apresentou-se os resultados e discussões do projeto da antena proposta neste trabalho de conclusão de curso. Acredita-se que além de resultados, os estudos apresentam uma metodologia de projeto que pode ser aplicada para reprojetar essa antena para outras condições, como materiais diferentes e outras faixas de frequência. Desse modo, entende-se que o trabalho cumpriu com o que foi prometido.

Capítulo 5

Conclusões, Contribuições e Trabalhos Futuros

5.1 Conclusões

Esse trabalho de conclusão de curso apresentou o projeto de uma antena de microfitas com características potenciais para aplicação em redes celulares 5G NR para a faixa de frequência 3,5GHz. Acredita-se que além do modelo final apresentado, destaca-se como importante contribuição do trabalho a formulação de uma metodologia que permite o reprojeto desta antena para outros materiais e faixas de frequência.

No Capítulo 1 deste trabalho apresentou-se os conceitos introdutórios, que apresentaram brevemente os conceitos do 5G NR e importância de antenas com polarização dupla para essa tecnologia. Neste capítulo teve-se como o ponto de partida do projeto, apresentando a relevância do tema escolhido.

No Capítulo 2 demonstrou-se de modo detalhado o referencial teórico necessário para a execução do trabalho. Basicamente, focou-se em apresentar cada etapa do projeto de uma antena de referência, destacando assim as modificações que essa técnica traz em um projeto de antena de microfita retangular convencional.

No Capítulo 3 discutiu-se a metodologia e os recursos necessários para a realização do trabalho. Mostrou-se, basicamente, as etapas definidas de execução, as métricas de análise e o simulador empregado no desenvolvimento. Acredita-se que esse capítulo é importante para nortear outros trabalhos similares.

No Capítulo 4 foram mostrados de forma detalhada, procurando descrever de forma objetiva e didática, os principais resultados do projeto. Para tal, mostrou-se o passo a passo para se chegar nos valores finais das dimensões da antena que atenderam as métricas propostas no trabalho. Assim, tem-se uma antena final capaz de operar em polarização dupla 3,47GHz à 3,53GHz com ganho na direção de máxima irradiação de 12,3dBi.

Com os resultados apresentados acredita-se que esse trabalho de curso atendeu com a sua proposta. Isso se dá, pois, além de obter uma antena com as características esperadas para

o 5G NR operando em 3,5GHz, apresentou-se uma metodologia de projeto que permite que outros trabalhos possam ser desenvolvidos a partir desse.

5.2 Propostas para a continuação do trabalho

A partir da metodologia apresentada, acredita-se que uma primeira proposta para a continuação desse trabalho seja o projeto em outras faixas definidas para o 5G NR no Brasil, como por exemplo 26GHz. Além disso, tendo em vista a existência de projeto de antenas de microfita retangulares de alto ganho operando em modos superiores, como o TM_{900} (19), pode-se aplicar conceitos análogos aos demonstrados nesse trabalho para propor novas configurações de antenas.

REFERÊNCIAS

- 1 DAHLMAN, E.; PARKVALL, S.; SKOLD, J. **5G NR: The Next Generation Wireless Access Technology**. 2nd, Elsevier Ltd, 2021
- 2 STALLINGS, W. **5G Wireless: A Comprehensive Introduction**. Pearson Education Inc, 2021
- 3 **3GPP “3rd Generation Partnership Project”**. Disponível em: <https://www.3gpp.org/>. Acesso em: 30, jan. 2023
- 4 **ITU “International Telecommunication Union”**. Disponível em: <https://www.itu.int/>. Acesso em: 30, jan. 2023
- 5 G. Liu, Y. Huang, Z. Chen, L. Liu, Q. Wang and N. Li, **“5G Deployment: Standalone vs. Non-Standalone from the Operator Perspective,”** in *IEEE Communications Magazine*, vol. 58, no. 11, pp. 83-89, November 2020
- 6 **Release 15 “Procedures for the 5G System”**. Disponível em: <https://www.3gpp.org/release-15>. Acesso em: 30, jan. 2023
- 7 **Release 16 “Procedures for the 5G System (5GS)”**. Disponível em: <https://www.3gpp.org/release-16>. Acesso em: 30, jan. 2023
- 8 **Draft new Report ITU-R M.[IMT-2020.EVAL] - Guidelines for evaluation of radio interface technologies for IMT-2020**. Disponível em: <https://www.itu.int/md/R15-SG05-C-0057>. Acesso em: 30, jan. 2023
- 9 L. L. Mendes et al., **“Enhanced Remote Areas Communications: The Missing Scenario for 5G and Beyond 5G Networks,”** in *IEEE Access*, vol. 8, pp. 219859-219880, 2020
- 10 F. Rinaldi, S. Pizzi, A. Orsino, A. Iera, A. Molinaro and G. Araniti, **“A Novel Approach for MBSFN Area Formation Aided by D2D Communications for eMBB Service Delivery in 5G NR Systems,”** in *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 69, no. 2, pp. 2058-2070, Feb. 2020
- 11 L. Miuccio, D. Panno and S. Riolo, **“A New Contention-Based PUSCH Resource Allocation in 5G NR for mMTC Scenarios,”** in *IEEE Communications Letters*, vol. 25, no. 3, pp. 802-806, March 2021

- 12 R. Ali, Y. B. Zikria, A. K. Bashir, S. Garg and H. S. Kim, **“URLLC for 5G and Beyond: Requirements, Enabling Incumbent Technologies and Network Intelligence,”** in *IEEE Access*, vol. 9, pp. 67064-67095, 2021
- 13 Ministério das Comunicações. Agência Nacional de Telecomunicações. **Resolução nº 742, de 01 de março de 2021.** Disponível em: <https://www.anatel.gov.br/legislacao/resolucoes/2021/1512-resolucao-742>. Acesso em: 30, jan. 2023
- 14 C. A. Balanis, **“Antenna theory: analysis and design”**, 3rd ed., John Wiley and Sons, New York, 2005
- 15 B. Feng, Y. Tu, J. Chen, S. Yin and K. L. Chung, **“Dual Linearly-Polarized Antenna Array With High Gain and High Isolation for 5G Millimeter-Wave Applications,”** in *IEEE Access*, vol. 8, pp. 82471-82480, 2020
- 16 A. Li and K. -M. Luk, **“Single-Layer Wideband End-Fire Dual-Polarized Antenna Array for Device-to-Device Communication in 5G Wireless Systems,”** in *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 69, no. 5, pp. 5142-5150, May 2020
- 17 X. Tong, Z. H. Jiang, C. Yu, F. Wu, X. Xu and W. Hong, **“Low-Profile, Broadband, Dual-Linearly Polarized, and Wide-Angle Millimeter-Wave Antenna Arrays for Ka-Band 5G Applications,”** in *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 20, no. 10, pp. 2038-2042, Oct. 2021
- 18 D. Yang, H. Zhai, C. Guo and C. Ma, **“A Novel Differentially Fed Dual-Polarized Filtering Magneto-Electric Dipole Antenna for 5G Base Station Applications,”** in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 70, no. 7, pp. 5373-5382, July 2022)
- 19 Y. He, Y. Li, W. Sun, Z. Zhang and P. -Y. Chen, **“Dual Linearly Polarized Microstrip Antenna Using a Slot-Loaded TM₅₀ Mode,”** in *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 17, no. 12, pp. 2344-2348, Dec. 2018
- 20 R. W. Dearnley and A. R. F. Barel, **“A comparison of models to determine the resonant frequencies of a rectangular microstrip antenna,”** in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 37, no. 1, pp. 114-118, Jan. 1989
- 21 J. Wen, D. Xie and L. Zhu, **“Bandwidth-Enhanced High-Gain Microstrip Patch Antenna Under TM₃₀ and TM₅₀ Dual-Mode Resonances,”** in *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 18, no. 10, pp. 1976-1980, Oct. 2019

- 22 H. Nawaz and A. U. Niazi, **“Characterization of dual-polarized monostatic patch antennas for full-duplex applications,”** in *Engineering Reports*, vol. 2, June. 2020